

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2019.06.002

水平受荷桩在桩顶嵌固时的刚度系数新解法

陈国周^{1,2}, 林智勇¹, 林文彬²

(1.福建工程学院 土木工程学院,福建 福州 350118;
2.闽台合作土木工程技术福建省高校工程研究中心,福建 福州 350118)

摘要: 针对水平受荷桩刚度系数的传统计算公式复杂、计算量大的缺点,使用桩顶嵌固的边界条件推导出水平受荷桩刚度系数新的表达式。采用幂级数证明了新解法与传统方法是等价的,并通过算例验证了两种方法得到的刚度系数是相同的。对刚度系数的影响因素分析表明,桩径对刚度系数影响较大,其中水平刚度系数近似按桩径的两次方进行增长,转动刚度系数近似按桩径的三次方进行增长。土体 m 值对刚度系数也有一定的影响,其中水平刚度系数按 m 值的 0.6 次幂进行增长,转动刚度系数按 m 值的 0.4 次幂进行增长。

关键词: 水平受荷桩;刚度系数; m 法;幂级数法

中图分类号: U 461;TP 308 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-4348(2019)06-0518-06

A new method for solving the stiffness coefficient of horizontally-loaded pile with its top embedded

CHEN Guozhou^{1,2}, LIN Zhiyong¹, LIN Wenbin²

(1.School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2.Fujian-Taiwan Cooperative Institute of Civil Engineering Technology in Universities of Fujian Province, Fuzhou 350118, China)

Abstract: For the design of horizontal piles, the traditional expression for calculating the stiffness coefficient is too complex, and needs a lot of computation. A new expression for the stiffness coefficient of horizontally-loaded piles was derived by using the boundary conditions of pile top embedding, which reduced a lot of computation. The new method was proved equivalent to the traditional method by power series, and an example was given to verify that the stiffness coefficient obtained by the two methods showed no difference. Analysis of the influencing factors of the stiffness coefficient showed that pile diameter had great impact on the stiffness coefficient, the horizontal stiffness coefficient increased approximately by the square of pile diameter, and the rotational stiffness coefficient increased almost by the cube of pile diameter. The m value of soil also had certain influence on the stiffness coefficient, i.e., the horizontal stiffness coefficient increased by 0.6 power of the m value, and the rotational stiffness coefficient increased by 0.4 power of the m value.

Keywords: horizontally-loaded pile; stiffness coefficient; m -method; power series method

水平受荷桩又称为抗水平力桩,在桥梁、港口码头、滑坡治理、高层建筑等工程中被广泛应用。桩受到水平荷载作用时,桩土之间的互相作用较复杂,桩的内力及变形计算一直是一个重要的研

究课题。水平受荷桩的理论模型和计算方法很多,根据地基水平抗力的不同假定有张氏法、 m 法、 k 法、 c 法,考虑土体抗力与桩的变形关系的 p - y 曲线法等^[1]。由于 m 法在桩基小变形时计算

结果与实际工程较为吻合,在工程界得到广泛应用,被列入我国多部规范,如铁路桥涵地基和基础设计规范^[2]、公路桥涵地基和基础设计规范^[3]和建筑桩基技术规范^[4]等。

许多学者在 m 法应用方面进行了深入的研究。赵明华^[5]采用幂级数求解,研究推导出一整套适合于我国工程应用的倾斜荷载受力桩的 m 法设计理论和计算方法。杨美良等^[6]考虑桩基的剪切变形影响,用单广义位移深梁理论,建立了桩基 m 法的计算方法,导出了初参数表达式和无量纲参数函数的统一表达式。李洪江等^[7]推导考虑侧壁摩擦力的桩基水平承载挠曲微分方程,提出小变形下考虑摩擦效应的桩基水平承载计算方法。李微哲等^[8]引入初始地基比例系数,提出了基于 m 法的双曲线型 $p-y$ 曲线。毛坚强等^[9]采用 m 法模型模拟桩前滑体对桩的抗力,并分别对桩在滑面以上、以下的部分建立计算方程,应用幂级数法解得其位移及内力的表达式,最终得到整个桩的变形和内力以及桩、土之间的作用力。Xenia 等^[10]研究了水平受荷桩的水平刚度系数,提出一种新的弹性动力分析模型。António 等^[11]分析了足尺桩基模型试验的数据,归纳出水平受荷桩的变形及弯矩分布规律。

目前,水平受荷桩的刚度系数改进方面的研究还比较少。本文针对水平受荷桩刚度系数的传统计算公式复杂、计算量大的缺点,使用桩顶嵌固的边界条件推导出水平受荷桩刚度系数新的表达式并分析桩径及土体 m 值对刚度系数的影响。

1 水平受荷桩刚度系数的传统计算方法

1.1 桩身变形的微分方程

水平受荷桩示意图如图 1。

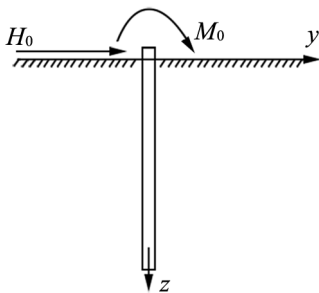


图 1 水平受荷桩示意图

Fig.1 Sketch of pile under horizontal load

根据材料力学微块平衡及土层抗力沿深度线性变化的假定,可推导出如图 1 所示的桩身变形的微分方程如下

$$\frac{d^4 y_z}{dz^4} + a^5 z y_z = 0 \quad (1)$$

$$a = \sqrt[5]{\frac{mb_0}{EI}} \quad (2)$$

式中: a 为桩的变形系数或称桩的特征值; y_z 为桩的水平变形值; z 为计算点到桩顶的距离; m 为土层水平抗力系数沿深度的比例系数; b_0 为桩的计算宽度; EI 为桩的抗弯刚度。

1.2 微分方程的幂级数解

式(1)可用幂级数展开来求解,只要知道桩顶的水平位移 y_0 、转角 φ_0 、弯矩 M_0 及剪力 Q_0 ,便可求得桩身任截面的水平位移 y_z 、转角 φ_z 、弯矩 M_z 及剪力 Q_z 的计算公式:

$$\left. \begin{aligned} y_z &= y_0 A_1 + \frac{\varphi_0}{\alpha} B_1 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_1 + \frac{H_0}{\alpha^3 EI} D_1 \\ \frac{\varphi_z}{\alpha} &= y_0 A_2 + \frac{\varphi_0}{\alpha} B_2 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_2 + \frac{H_0}{\alpha^3 EI} D_2 \\ \frac{M_z}{\alpha^2 EI} &= y_0 A_3 + \frac{\varphi_0}{\alpha} B_3 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_3 + \frac{H_0}{\alpha^3 EI} D_3 \\ \frac{Q_z}{\alpha^3 EI} &= y_0 A_4 + \frac{\varphi_0}{\alpha} B_4 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_4 + \frac{H_0}{\alpha^3 EI} D_4 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 $A_1, B_1, \dots, C_4, D_4$ 为无量纲系数,而 A_2, B_2, C_2, D_2 是 A_1, B_1, C_1, D_1 的一阶导数, A_3, B_3, C_3, D_3 是 A_1, B_1, C_1, D_1 的二阶导数, A_4, B_4, C_4, D_4 是 A_1, B_1, C_1, D_1 的三阶导数。 A_1, B_1, C_1, D_1 表达式如下

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= 1 + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{(5k-4)!!}{(5k)!} (az)^{5k} \\ B_1 &= \alpha \left[z + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{(5k-3)!!}{(5k+1)!} \times \frac{1}{\alpha} (az)^{5k+1} \right] \\ C_1 &= \frac{a^2}{2} \left[z^2 + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{(5k-2)!!}{(5k+2)!} \times \frac{2}{\alpha^2} (az)^{5k+2} \right] \\ D_1 &= \frac{a^3}{6} \left[z^3 + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{(5k-1)!!}{(5k+3)!} \times \frac{6}{\alpha^3} (az)^{5k+3} \right] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$(5k-4)!! =$$

$$(5k-4) [5(k-1)-4] \cdots (5 \times 1 - 4) \quad (5)$$

$$(5k)! = (5k) (5k-1) \cdots 2 \times 1 \quad (6)$$

1.3 柔度系数

要求解式(3),需要桩顶的水平位移 y_0 、转角

φ_0 、弯矩 M_0 及剪力 Q_0 。引入柔度系数,该系数表示受到单位荷载而产生的相应位移。假设桩底自由,则可推导出柔度系数表达式如下

$$\delta_{HH} = \frac{1}{\alpha^3 EI} \times \frac{B_3 D_4 - B_4 D_3}{A_3 B_4 - A_4 B_3} \quad (7)$$

$$\delta_{MH} = \frac{1}{\alpha^2 EI} \times \frac{A_3 D_4 - A_4 D_3}{A_3 B_4 - A_4 B_3} \quad (8)$$

$$\delta_{HM} = \delta_{MH} \quad (9)$$

$$\delta_{MM} = \frac{1}{\alpha EI} \times \frac{A_3 C_4 - A_4 C_3}{A_3 B_4 - A_4 B_3} \quad (10)$$

式中 δ_{ij} 表示 j 方向受到单位荷载时在 i 方向产生的相应位移。当 $i = H$ 时,表示水平位移;当 $i = M$ 时,表示转角。当 $j = H$ 时,表示水平荷载;当 $j = M$ 时,表示弯矩。

桩顶的水平位移 y_0 、转角 φ_0 可以用柔度系数表示为

$$\varphi_0 = -H_0 \delta_{MH} + M_0 \delta_{MM} \quad (11)$$

$$y_0 = H_0 \delta_{HH} + M_0 \delta_{HM} \quad (12)$$

本研究在推导过程中假定了桩底是自由的,如果桩端土的约束不可忽略,则在柔度系数表达式中需要增加这部分的影响。

1.4 刚度系数

刚度系数表示单位位移而产生的相应内力,本研究推导桩顶嵌固时的刚度系数,如图 2 所示,桩顶嵌固时,在桩顶的转角为 0。

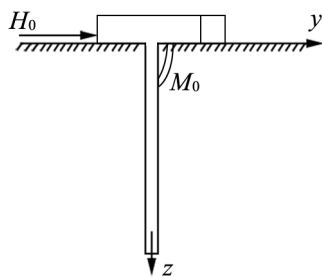


图 2 桩顶嵌固示意图

Fig.2 Sketch of pile with its top embedded

把 $\varphi_0 = 0$ 代入式(11),得

$$M_0 = -H_0 \frac{\delta_{MH}}{\delta_{MM}} \quad (13)$$

把式(13)代入式(12),得

$$y_0 = H_0 \left(\delta_{HH} - \frac{\delta_{MH}^2}{\delta_{MM}} \right) \quad (14)$$

令 $y_0 = 1$ (即单位水平位移)

得

$$\rho_{HH} = H_0 = \frac{1}{\delta_{HH} - \frac{\delta_{MH}^2}{\delta_{MM}}} \quad (15)$$

$$\rho_{MH} = -M_0 = \frac{\delta_{MM}}{\delta_{HH} \delta_{MM} - \delta_{MH}^2} \times \frac{\delta_{MH}}{\delta_{MM}} \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} \rho_{HH} &= \frac{\delta_{MM}}{\delta_{HH} \delta_{MM} - \delta_{MH}^2} \\ \rho_{MH} &= \frac{\delta_{MH}}{\delta_{HH} \delta_{MM} - \delta_{MH}^2} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中 ρ_{HH} 为水平刚度系数, ρ_{MH} 为转动刚度系数。

把式(7)-(10)代入式(17),得

$$\left. \begin{aligned} \rho_{HH} &= \frac{\alpha^3 EI (A_3 C_4 - A_4 C_3) (A_3 B_4 - A_4 B_3)}{(B_3 D_4 - B_4 D_3) (A_3 C_4 - A_4 C_3) - (A_3 D_4 - A_4 D_3)^2} \\ \rho_{MH} &= \frac{\alpha^2 EI (A_3 D_4 - A_4 D_3) (A_3 B_4 - A_4 B_3)}{(B_3 D_4 - B_4 D_3) (A_3 C_4 - A_4 C_3) - (A_3 D_4 - A_4 D_3)^2} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式(18)是现行规范所用的计算式。

2 刚度系数新解法

2.1 推导过程

桩顶嵌固,产生单位水平位移,则边界条件为 $\varphi_0 = 0$, $y_0 = 1$ 。桩底自由,则有边界条件为 $M_h = 0$, $Q_h = 0$ 。把这两个边界条件代入式(3),得

$$\left. \begin{aligned} y_z &= A_1 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_1 + \frac{H_0}{\alpha^3 EI} D_1 \\ \frac{\varphi_z}{\alpha} &= A_2 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_2 + \frac{H_0}{\alpha^3 EI} D_2 \\ 0 &= A_3 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_3 + \frac{H_0}{\alpha^3 EI} D_3 \\ 0 &= A_4 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_4 + \frac{H_0}{\alpha^3 EI} D_4 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

只需取后面两个式子

$$\left. \begin{aligned} 0 &= A_3 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_3 + \frac{H_0}{\alpha^3 EI} D_3 \\ 0 &= A_4 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_4 + \frac{H_0}{\alpha^3 EI} D_4 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

得

$$\rho_{HH}^* = H_0 = \frac{\alpha^3 EI (A_3 C_4 - A_4 C_3)}{C_3 D_4 - C_4 D_3} \quad (21)$$

$$\rho_{MH}^* = -M_0 = \frac{\alpha^2 EI (A_3 D_4 - A_4 D_3)}{C_3 D_4 - C_4 D_3} \quad (22)$$

式中 ρ_{HH}^* , ρ_{MH}^* 为用新方法推导出来的刚度系数, 物理意义分别与 ρ_{HH} 、 ρ_{MH} 相同。

2.2 新解法的证明

把 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 求二次导数得到 A_3 、 B_3 、 C_3 、 D_3 。根据级数展开, 得

$$A_3 = -\frac{(az)^3}{3!} + 6\frac{(az)^8}{8!} - 6 \times 11\frac{(az)^{13}}{13!} + 6 \times 11 \times 16\frac{(az)^{18}}{18!} - \dots \quad (23)$$

$$B_3 = -2\frac{(az)^4}{4!} + 2 \times 7\frac{(az)^9}{9!} + 2 \times 7 \times 12\frac{(az)^{14}}{14!} + \dots \quad (24)$$

$$C_3 = 1 - 3\frac{(az)^5}{5!} + 3 \times 8\frac{(az)^{10}}{10!} - 3 \times 8 \times 13\frac{(az)^{15}}{15!} + \dots \quad (25)$$

$$D_3 = az - 4\frac{(az)^6}{6!} + 4 \times 9\frac{(az)^{11}}{11!} - 4 \times 9 \times 14\frac{(az)^{16}}{16!} + \dots \quad (26)$$

把 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 求三次导数得到 A_4 、 B_4 、 C_4 、 D_4 根据级数展开, 得

$$A_4 = -\frac{(az)^2}{2!} + 6\frac{(az)^7}{7!} - 6 \times 11\frac{(az)^{12}}{12!} + 6 \times 11 \times 16\frac{(az)^{17}}{17!} - \dots \quad (27)$$

$$B_4 = -2\frac{(az)^3}{3!} + 2 \times 7\frac{(az)^8}{8!} + 2 \times 7 \times 12\frac{(az)^{13}}{13!} + \dots \quad (28)$$

$$C_4 = -3\frac{(az)^4}{4!} + 3 \times 8\frac{(az)^9}{9!} - 3 \times 8 \times 13\frac{(az)^{14}}{14!} + \dots \quad (29)$$

$$D_4 = 1 - 4\frac{(az)^5}{5!} + 4 \times 9\frac{(az)^{10}}{10!} - 4 \times 9 \times 14\frac{(az)^{15}}{15!} + \dots \quad (30)$$

根据式(23)至式(30), 可得

$$B_4 C_3 - B_3 C_4 + A_3 D_4 - A_4 D_3 = 0 \quad (31)$$

上式两边乘以 $A_3 D_4 - A_4 D_3$

$$(B_4 C_3 - B_3 C_4) (A_3 D_4 - A_4 D_3) + (A_3 D_4 - A_4 D_3)^2 = 0 \quad (32)$$

把上式展开, 并移项

$$A_3 B_4 C_3 D_4 + A_4 B_3 C_4 D_3 = A_3 B_3 C_4 D_4 + A_4 B_4 C_3 D_4 - (A_3 D_4 - A_4 D_3)^2 \quad (33)$$

上式两边减去 $(A_3 B_4 C_4 D_3 + A_4 B_3 C_3 D_4)$, 得

$$A_3 B_4 C_3 D_4 - A_3 B_4 C_4 D_3 - A_4 B_3 C_3 D_4 + A_4 B_3 C_4 D_3 = A_3 B_3 C_4 D_4 - A_3 B_4 C_4 D_3 - A_4 B_3 C_3 D_4 + A_4 B_4 C_3 D_4 - (A_3 D_4 - A_4 D_3)^2 \quad (34)$$

合并同类项, 得

$$(C_3 D_4 - C_4 D_3) (A_3 B_4 - A_4 B_3) = (B_3 D_4 - B_4 D_3) (A_3 C_4 - A_4 C_3) - (A_3 D_4 - A_4 D_3)^2 \quad (35)$$

两边乘以 $(\alpha^2 EI (A_3 D_4 - A_4 D_3))$, 并移项, 得

$$\frac{\alpha^2 EI (A_3 D_4 - A_4 D_3)}{C_3 D_4 - C_4 D_3} = \frac{\alpha^2 EI (A_3 D_4 - A_4 D_3) (A_3 B_4 - A_4 B_3)}{(B_3 D_4 - B_4 D_3) (A_3 C_4 - A_4 C_3) - (A_3 D_4 - A_4 D_3)^2} \quad (36)$$

即

$$\rho_{HH}^* = \rho_{HH} \quad (37)$$

同样方法, 可以证明

$$\rho_{MH}^* = \rho_{MH} \quad (38)$$

证毕。

3 算例

3.1 算例参数

某单桩与承台连接, 假定桩顶为嵌固。桩截面直径 $d = 1.0 \text{ m}$, $h = 10 \text{ m}$, 桩身混凝土 C30, 保护层厚度取 0.05 m , 配筋率 $\rho_g = 0.004$, 水平抗力系数的比例系数 $m = 2 \times 10^4 \text{ kN/m}^4$, 钢筋弹模 $E_s = 2.1 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$, 混凝土弹模 $E_c = 3 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$, 计算该水平受荷桩的刚度系数。根据建筑桩基技术规范, 计算桩顶嵌固时的刚度系数。

扣除保护层后的有效直径

$$d_0 = 0.9 \text{ m}$$

桩身截面抵抗矩

$$W_0 = \frac{\pi d^3}{32} [d^2 - 2(\alpha_E - 1) \rho_g d_0^2] =$$

$$\frac{3.1416}{32} [1^2 - 2 \times (7 - 1) \times 0.004 \times 0.9^2] =$$

$$0.102\ 0\ \text{m}^3$$

桩截面惯性矩

$$I_0 = W_0 \frac{d_0}{2} = 0.102\ 0 \times \frac{0.9}{2} = 0.045\ 9\ \text{m}^4$$

桩身抗弯刚度

$$EI = 0.85E_c I_0 =$$

$$0.85 \times 3 \times 10^7 \times 0.045\ 9 = 1.170 \times 10^6\ \text{kN/m}^2$$

桩身计算宽度为

$$b_0 = 0.9 \times (1.5 \times 1 + 0.5) = 1.8\ \text{m}$$

桩的水平变形系数

$$\alpha = \sqrt[5]{\frac{mb_0}{EI}} = \sqrt[5]{\frac{2 \times 10^4 \times 1.8}{1.170 \times 10^6}} = 0.498\ 5\ \text{m}^{-1}$$

3.2 传统方法计算刚度系数

采用建筑桩基规范方法计算

$$\delta_{HH} = \frac{1}{\alpha^3 EI} \times \frac{B_3 D_4 - B_4 D_3}{A_3 B_4 - A_4 B_3} =$$

$$\frac{1}{0.498\ 5^3 \times 1.17 \times 10^6} \times$$

$$\frac{[(-11.730\ 66) \times (-23.140\ 40) -$$

$$\frac{[(-1.614\ 28) \times (-0.357\ 62) -$$

$$\leftarrow \frac{(-0.357\ 62) \times (-15.075\ 50)]}{(9.243\ 68) \times (-11.730\ 66)]} =$$

$$1.684\ 0 \times 10^{-5}\ \text{m/kN}$$

$$\delta_{MH} = \frac{1}{\alpha^2 EI} \times \frac{A_3 D_4 - A_4 D_3}{A_3 B_4 - A_4 B_3} =$$

$$\frac{1}{0.498\ 5^2 \times 1.17 \times 10^6} \times$$

$$\frac{[(-1.614\ 28) \times (-23.140\ 40) -$$

$$\frac{[(-1.614\ 28) \times (-0.357\ 62) -$$

$$\leftarrow \frac{(9.243\ 68) \times (-15.075\ 50)]}{(9.243\ 68) \times (-11.730\ 66)]} =$$

$$5.575\ 3 \times 10^{-6}\ \text{kN}^{-1}$$

$$\delta_{MM} = \frac{1}{\alpha EI} \times \frac{A_3 C_4 - A_4 C_3}{A_3 B_4 - A_4 B_3} =$$

$$\frac{1}{0.498\ 5 \times 1.17 \times 10^6} \times$$

$$\frac{[(-1.614\ 28) \times (-15.610\ 50) -$$

$$\frac{[(-1.614\ 28) \times (-0.357\ 62) -$$

$$\leftarrow \frac{(9.243\ 68) \times (-17.918\ 60)]}{(9.243\ 68) \times (-11.730\ 66)]} =$$

$$3.001\ 4 \times 10^{-6}\ (\text{kN} \cdot \text{m})^{-1}$$

$$\rho_{HH} = \frac{\delta_{MM}}{\delta_{HH} \delta_{MM} - \delta_{MH}^2} =$$

$$3.001\ 4 \times 10^{-6}$$

$$\frac{1.684\ 0 \times 10^{-5} \times 3.001\ 4 \times 10^{-6} - (5.575\ 3 \times 10^{-6})^2}{1.542 \times 10^5\ \text{kN/m}}$$

$$\rho_{MH} = \frac{\delta_{MH}}{\delta_{HH} \delta_{MM} - \delta_{MH}^2} =$$

$$\frac{5.575\ 3 \times 10^{-6}}{1.684\ 0 \times 10^{-5} \times 3.001\ 4 \times 10^{-6} - (5.575\ 3 \times 10^{-6})^2} =$$

$$2.865 \times 10^5\ \text{kN} \cdot \text{m/m}$$

3.3 采用本文提出的新解法

$$\rho_{HH}^* = \alpha^3 EI \times \frac{A_3 C_4 - A_4 C_3}{C_3 D_4 - C_4 D_3} =$$

$$0.498\ 5^3 \times 1.17 \times 10^6 \times$$

$$\frac{[(-1.614\ 28) \times (-15.610\ 50) -$$

$$\frac{[(-17.918\ 60) \times (-23.140\ 40) -$$

$$\leftarrow \frac{(9.243\ 68) \times (-17.918\ 60)]}{(-15.610\ 50) \times (-15.075\ 50)]} =$$

$$1.542 \times 10^5\ \text{kN/m}$$

$$\rho_{MH}^* = \frac{\alpha^2 EI (A_3 D_4 - A_4 D_3)}{C_3 D_4 - C_4 D_3} =$$

$$0.498\ 5^2 \times 1.17 \times 10^6 \times$$

$$\frac{[(-1.614\ 28) \times (-23.140\ 40) -$$

$$\frac{[(-17.918\ 60) \times (-23.140\ 40) -$$

$$\leftarrow \frac{(9.243\ 68) \times (-15.075\ 50)]}{(-15.610\ 50) \times (-15.075\ 50)]} =$$

$$2.865 \times 10^5\ \text{kN} \cdot \text{m/m}$$

比较计算结果可知

$$\rho_{HH}^* = \rho_{HH}$$

$$\rho_{MH}^* = \rho_{MH}$$

3.4 影响因素分析

3.4.1 桩径影响

实际工程中,桩截面直径和土体 m 值变化范围较大,对刚度系数计算结果影响较大,因此对这两个因素进行分析。采用本算例的参数,分别计算出桩截面直径 d 为 0.8、0.9、1.0、1.1、1.2、1.3 m 所对应的刚度系数。

如图 3 所示,桩径对刚度系数影响较大,其中水平刚度系数大约按桩径的两次方进行增长,转动刚度系数大约按桩径的三次方进行增长。

3.4.2 土体 m 值影响

根据本算例的参数,分别计算出土体 m 值为 4×10^3 、 8×10^3 、 12×10^3 、 16×10^3 、 20×10^3 、 $24 \times 10^3\ \text{kN/m}^4$ 所对应的刚度系数。如图 4 所示,土体 m 值对刚度系数也有一定的影响,其中水平刚度系

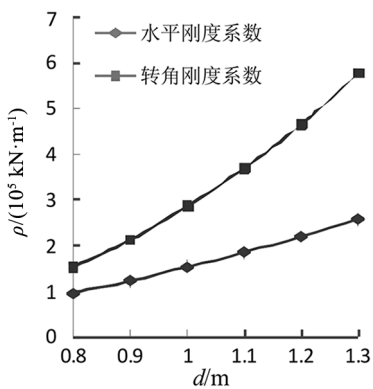


图 3 桩径对刚度系数的影响

Fig.3 Impact of pile diameter on stiffness coefficient

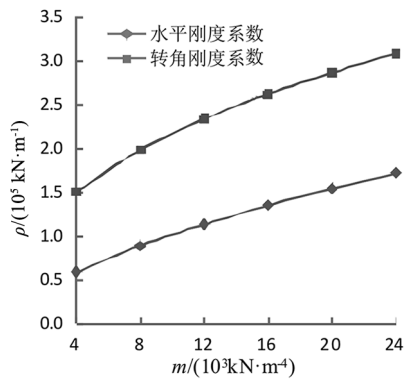


图 4 土体 m 值对刚度系数的影响

Fig.4 Impact of the m value of soil on stiffness coefficient

参考文献:

[1] 胡人礼. 桥梁桩基础分析和设计[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1987: 86-136.

[2] 中华人民共和国行业标准编写组. 铁路桥涵地基和基础设计规范: TB 10093-2017 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017: 21-32.

[3] 中华人民共和国行业标准编写组. 公路桥涵地基和基础设计规范: JTG D63-2007 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 83-99.

[4] 中华人民共和国行业标准编写组. 建筑桩基技术规范: JGJ 94-2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 127-144.

[5] 赵明华. 倾斜荷载下基桩的受力研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2001: 43-67.

[6] 杨美良, 罗婉庆, 张建仁. 考虑剪切变形影响的桩基 m 法计算理论[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(6): 54-61.

[7] 李洪江, 刘松玉, 童立元, 等. 小变形下考虑摩擦效应的桩基水平承载分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(1): 230-238.

[8] 李微哲, 娄平. m 法下的双曲线型 p - y 曲线[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(2): 115-122.

[9] 毛坚强, 徐骏, 杨磊. 滑体段采用 m 法模型的抗滑桩计算方法. 岩土力学, 2018, 39(4): 1197-1202.

[10] KARATZIA X, MYLONAKIS G. Horizontal stiffness and damping of piles in inhomogeneous soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2017, 143(4): 1-19.

[11] DE SOUSA COUTINHO, ANTÓNIO G. Data reduction of horizontal load full-scale tests on bored concrete piles and pile groups[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(6): 752-769.