

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.02.015



m 法下的双曲线型 p - y 曲线

李微哲^{1,2}, 娄平¹

(1. 中南大学 土木工程学院, 长沙 410012; 2. 中煤科工集团重庆设计研究院有限公司, 重庆 400016)

摘要:工程中基桩大多处于复杂的成层地基中, 鲜有位于单一土层中, 从宏观角度出发, 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。某现场 7 根试桩地基土非线性显著, 实测和理论计算的地面处桩身水平位移-水平荷载关系曲线均呈良好的二次抛物线关系, 且理论与实测曲线吻合良好, 验证了本文 p - y 曲线模型。地基土非线性对桩身最大弯矩、桩侧地基土压力影响显著, 不容忽略。工程实际中采用 m 法计算基桩最大弯矩值偏小, 建议乘以 1.05~1.25 的系数, 以计入地基土非线性影响。

关键词: m 法; 初始地基比例系数; 双曲线型 p - y 曲线; 基桩

中图分类号: TU473.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)02-0115-08

Analysis of pileby p - y curve method based on m-method

Li Weizhe^{1,2}, Lou Ping²

(1. College of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410000, P. R. China; 2. China Coal Technology & Engineering Group, Chongqing Design & Research Institute Co. Ltd., Chongqing 400016, P. R. China)

Abstract: Most piles are set in layered soils. The initial foundation coefficient, a hyperbolic p - y curve containing a parameter, is derived to generally simulate the nonlinear soil around the pile. The soil around the tested pile is nonlinear, and both the tested and the calculated lateral displacement of the tested pile at the ground have a parabolic relation with the horizontal loads. The calculated lateral displacements of the tested pile at the ground fit the tested lateral displacements very well, and the hyperbolic p - y curve is proved good. The nonlinear soil will greatly increase both the maximum moment of the pile and the soil pressure. Thus it is suggested that the designed moment of the pile which is calculated by m-method, should magnified 1.05~1.25 times in order to consider the nonlinearity of the soil around the pile.

Keywords: m-method; the initial foundation coefficient; hyperbolic p - y curve; pile

模拟桩侧非线性土一般采用 p - y 曲线法。学者们此进行了大量室内模型试验研究, 提出了很多不同形式的 p - y 曲线。但基于现场试桩水平承载力试验并从宏观角度研究 p - y 曲线的极少。

Matlock^[2]、Reese 等^[3]、Stvens 等^[4] 提出了粘性土 p - y 曲线, 其桩侧土压力与桩身水平位移成幂

函数关系; 王惠初等^[6]、田平等^[6] 基于钢管模型桩试验提了河海大学新统一法, 其桩侧粘土压力与桩身水平位移为双曲线函数关系。API 规范中砂土 p - y 曲线、王腾等^[7] 基于钢管模型桩试验提出的粉土 p - y 曲线、戚春香等^[8] 提出的弱饱和土 p - y 曲线, 其桩侧土压力与水平位移为双曲正切函数关系。王国粹

收稿日期: 2016-07-08

作者简介: 李微哲(1981-), 男, 高级工程师, 博士生, 主要从事桩基础及路基稳定研究, (E-mail)46414461@qq.com.

Received: 2016-07-08

Author brief: Li Weizhe(1981-), senior engineer, PhD candidate, main research interests: pile foundation and subgrade engineering, (E-mail)46414461@qq.com.

等^[9]认为砂土 p - y 曲线亦可用双曲线函数模拟。李雨润等^[10]提出了液化土中 p - y 曲线的修正算法,凌贤长等^[11]、刘红军等^[12]较为全面的介绍了液化土 p - y 曲线研究进展。楼晓明等^[13]提出了一种根据 p - y 曲线计算地基比例系数的方法,首次将 p - y 曲线与 m 法结合了起来。刘红军等^[14]根据玻璃管桩模型试验提出了黄河水下三角洲快速沉积粉土层的 p - y 曲线,其桩侧土压力与桩身水平位移为双曲线函数关系。

上述 p - y 曲线均依据模型桩试验结果提出,特征参数确定较为复杂,侧重不同类型土非线性研究,地域性特征明显。工程基桩大多位于多层土中,极少位于单一匀质土层中,实际工程环境比室内模型试验环境复杂得多。因此基于工程试桩水平承载力试验并从宏观角度研究桩侧土 p - y 曲线,再进一步研究的基桩受力性能具有实际意义。

基于王惠初等^[5]提出的粘土双曲线型 p - y 曲线和王国粹等^[9]提出的砂土双曲线型 p - y 曲线,并假定桩侧极限土压力与朗肯被动土压力线性相关,从宏观角度出发,引入初始地基比例系数,提出基于 m 法的双曲线型 p - y 曲线,并从宏观上总体研究桩侧土非线性特征,进而研究基桩受力特性。

1 基于 m 法的双曲线型 p - y 曲线

按王惠初等^[5]提出的粘土双曲线型 p - y 曲线(又称河海大学统一法)为

$$\begin{cases} p = \frac{y}{ay_{50} + by} p_u = \frac{y}{\frac{ay_{50}}{b} + y} \cdot \frac{p_u}{b} \\ y_{50} = A\epsilon_{50}D \end{cases} \quad (1)$$

式中: y 为水平位移; p 为发生水平位移 y 时的桩侧土压力; p_u 为桩侧极限土压力; D 为桩径; ϵ_{50} 为土三轴试验中最大主应力达到极限主应力一半时的应变值; β 为系数,文献^[5]中建议软粘土可取 9,硬粘土取 12; A 为系数。

按文献^[9]提出的砂土双曲线型 p - y 曲线为

$$p = \frac{y}{ay_c + by} p_u = \frac{y}{\frac{ay_c}{b} + y} \cdot \frac{p_u}{b} \quad (2)$$

式中: a 、 b 为系数,文献^[9]中建议 $a = 0.186$ 、 $b = 0.929$; y_c 为位移参考值,其余符号意义同式(1)。

从宏观角度出发,沿袭 m 法地面桩侧土压力为零的特点,假定桩侧极限土压力与朗肯无粘性被动土压力线性相关,计算式为

$$p_u = C\gamma z \tan^2(45^\circ + \varphi/2) \quad (3)$$

式中: C 为系数; φ 为内摩擦角,可取基桩深度范围内各土层内摩擦角的加权平均值; γ 为土容重,可取基桩深度范围内各土层容重的加权平均值; z 为计算点深度。

将式(3)代入式(1),则黏土 p - y 曲线为

$$\begin{cases} p = \frac{y_L}{y_L + y} m_0 z y \\ m_0 = \frac{C\gamma \tan^2(45^\circ + \varphi/2)}{ay_{50}} \\ y_L = \frac{a}{b} y_{50} \end{cases} \quad (4)$$

将式(3)代入式(2),则砂土 p - y 曲线为

$$\begin{cases} p = \frac{y_L}{y_L + y} m_0 z y \\ m_0 = \frac{C\gamma \tan^2(45^\circ + \varphi/2)}{ay_c} \\ y_L = \frac{a}{b} y_c \end{cases} \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可知,砂土和黏土 p - y 曲线形式相似。工程实际中基桩极少位于单一砂性土或单一粘性土中,大多位于砂性土和粘性土等组成的成层地基中。且基于单一土层的 p - y 曲线虽已有大量研究成果,却与现行规范推荐的 m 法联系甚微,不便于工程推广应用。因此,构想一种参数较少、形式简介又承袭 m 法的 p - y 曲线有工程实际意义。

从宏观应用角度出发,本文提出了一种基于 m 法的 p - y 曲线,以方便工程实际中计入桩周地基土非线性的影响,形式为

$$p = \frac{y_L}{y_L + y} m_0 z y \quad (6)$$

式(6)即由式(4)和式(5)演变而来, p 为地面以下 z 处桩身发生水平位移 y 时对应的桩侧土压力; m_0 为初始地基比例系数,可由基桩水平承载力试验确定或经验选取,有水平承载力试验时可取第 1~3 级水平荷载位移值反算的地基比例系数均值再乘以大于 1 的经验系数确定,一般为 1.1~2.0,非线性特征小取小值,非线性特征大则取大值; y_L 为位移特征值,主要与桩周土整体非线性特性有关,其值由桩周土总体非线性特征显著程度决定,非线性特征越显著则位移特征值愈小,非线性特征越小则位移特征值愈大,当趋于线性时位移特征值理论值趋无穷大;当合理选定了 m_0 值后,根据最后一级水平力荷载下的位移值,即可反算得 y_L 值。

上述双曲线型 p - y 曲线承袭了 m 法假定,形式简洁,参数少,现有商业有限元软件可通过多段折线弹簧模拟,易于被工程技术人员接受。

通过软硬不同的各类土中试桩的 m_0 值和 y_L 值,汇总成表,并作为工程应用计算参数参考值是有意义的。

2 基于 m 法 p - y 曲线的基桩有限元计算步骤

1) 划分节点和单元。

2) 按有限杆单元法形成单元荷载矩阵、位移矩阵、刚度矩阵矩阵。

3) 根据桩侧土压力本构模型,即按式(4)~(6)计算地基土约束的节点等效弹簧刚度矩阵 $[k]$ 。地面以下深度 z_i 处 i 节点的地基土弹性刚度按式(7)计算。

$$k_i = \frac{x_L m_0 z_i}{x_L + x_i} \cdot b \cdot \frac{(z_{i+1} - z_{i-1})}{2} \quad (5)$$

式中: $i, i+1, i-1$ 为单元节点编号; x_i 为 i 节点的水平位移; z_i 为 i 节点埋深; b 为基桩计算宽度,首次迭代计算时候取值为 0; m_0 、 y_L 意义同式(4)~(6)。

4) 基桩总体刚度方程为

$$\{F\} + [k]\{-\delta\} = [K]\{\delta\} \quad (8)$$

或

$$\{F\} = [K + k]\{\delta\} \quad (9)$$

式中: $\{F\}$ 为荷载列阵; $\{\delta\}$ 为位移列阵; $[K]$ 为初始刚度矩阵; $[k]$ 为节点边界约束刚度矩阵。

5) 求解式(8)~(9)可得单元节点位移。

6) 将求解的位移代入式(7),求得新的边界条件刚度矩阵,如此重复(3)~(5)步骤直至计算精度满足要求。

7) 根据单元节点位移结果和杆单元刚度方程,即可计算得到节点内力。如需考虑 P - Δ 效应,杆单元刚度矩阵方程可按文献[15-16]中方法计入轴力影响即可。

3 验证案例一

根据文献[1]的基桩水平承载力现场试验,场地上层为 3.5~4 m 厚的灰褐色轻亚粘土,可塑到软塑状态;下层为灰色粉砂,饱和中密状态;地下水位深为 2.0 m,水平力采用循环加载方式。为规避基桩因开裂抗弯刚度变化,仅取基桩开裂荷载前的试验数据进行对比分析。试桩直径 $d=0.6$ m,2# 桩长 9 m,3# 桩长 12 m,6# 桩长 6 m。计算宽度按现行规范计取,混凝土弹性模量 $E_h=3.0 \times 10^4$ MPa,计算刚度为 $E_h I_h / 1.5$, I_h 为混凝土全截面惯性矩。

2# 桩前 3 级水平力试验数据反算的地基比例系数分别为 11.47、11.83、10.53 MN/m^4 ,其平均值

的 1.6 倍为 18 MN/m^4 ,则初始地基比例系数 $m_0 = 18 \text{ MN}/\text{m}^4$, $y_L = 1.5 \text{ mm}$ 。

3# 桩前 3 级水平力试验数据反算的地基比例系数分别为 38.96、48.25、32.75 MN/m^4 ,其平均值的 1.6 倍为 64 MN/m^4 ,则初始地基比例系数 $m_0 = 64 \text{ MN}/\text{m}^4$, $y_L = 0.526 \text{ mm}$ 。

6# 桩前 3 级水平力试验数据反算的地基比例系数分别为 8.96、11.1、13.56 MN/m^4 ,其平均值的 1.6 倍为 17.9 MN/m^4 ,则初始地基比例系数 $m_0 = 17.9 \text{ MN}/\text{m}^4$, $y_L = 1.5 \text{ mm}$ 。

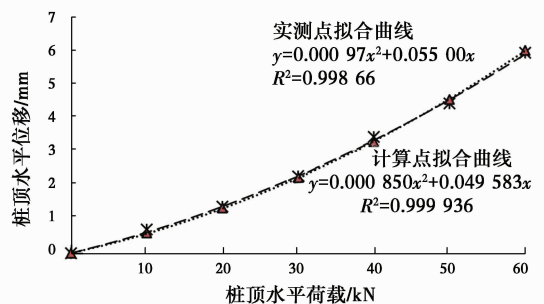
按本文第 2 节方法步骤,基桩按单元长 0.1 m 的长度划分为单元,并用自编 MATLAB 有限元程序计算。文献[1]中 2# 桩地面处位移实测值与计算值如表 1 和图 1,3# 桩地面处位移实测值与计算值如表 2 和图 2,6# 桩地面处位移实测值与计算值如表 3 和图 3。

表 1 2# 水平荷载下地面处桩身计算位移及实测位移

Table 1 The calculated and the measured lateral displacement of the 2nd tested pile under lateral loads at the ground

| 桩顶水平力/kN | 桩顶实测位移/mm | 桩顶计算位移/mm | 绝对误差/mm | 相对误差/% | 文献[1] m 值/ $(\text{MN} \cdot \text{m}^{-4})$ |
|----------|-----------|-----------|---------|--------|--|
| 10 | 0.708 | 0.604 | -0.104 | -14.69 | 11.47 |
| 20 | 1.390 | 1.349 | -0.041 | -2.95 | 11.83 |
| 30 | 2.235 | 2.250 | 0.015 | 0.67 | 10.53 |
| 40 | 3.470 | 3.324 | -0.146 | -4.21 | 8.18 |
| 50 | 4.468 | 4.586 | 0.118 | 2.64 | 7.78 |
| 60 | 5.980 | 6.052 | 0.072 | 1.20 | 6.70 |

注:表中 m 值见文献[1],即由实测位移反算而得。



注: × 实测位移 ▲ 计算位移
--- 多项式(实测位移) 多项式(计算位移)

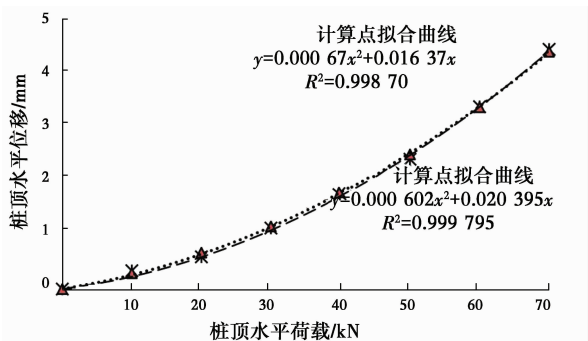
图 1 2# 试桩地面桩身水平力-水平位移关系曲线
Fig. 1 The relationship of the horizontal loads and the lateral displacement of the 2nd tested pile at the ground

表 2 3# 水平荷载下地面处桩身计算位移及实测位移

Table 2 The calculated and the measured lateral displacement of the 3rd tested pile under lateral loads at the ground

| 桩顶水平力/kN | 桩顶实测位移/mm | 桩顶计算位移/mm | 绝对误差/mm | 相对误差/% | 文献[1] m 值/(MN·m ⁻⁴) |
|----------|-----------|-----------|---------|--------|-----------------------------------|
| 10 | 0.34 | 0.292 | -0.048 | -13.98 | 38.96 |
| 20 | 0.598 | 0.675 | 0.077 | 12.96 | 48.25 |
| 30 | 1.132 | 1.162 | 0.030 | 2.67 | 32.75 |
| 40 | 1.683 | 1.766 | 0.083 | 4.92 | 27.32 |
| 50 | 2.41 | 2.499 | 0.089 | 3.70 | 21.73 |
| 60 | 3.385 | 3.375 | -0.010 | -0.30 | 15.23 |
| 70 | 4.45 | 4.406 | -0.044 | -1.00 | 13.73 |

注:表中 m 值见文献[1],即由实测位移反算而得。



注: × 实测位移 ▲ 计算位移
--- 多项式(实测位移) 多项式(计算位移)

图 2 3# 试桩地面桩身水平力-水平位移关系曲线

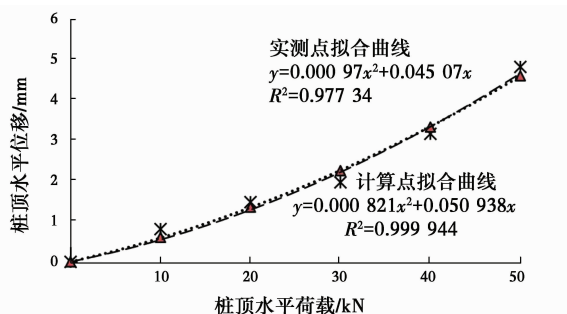
Fig. 2 The relationship of the horizontal loads and the lateral displacement of the 3rd tested pile at the ground

表 3 6# 水平荷载下地面处桩身计算位移及实测位移

Table 3 The calculated and the measured lateral displacement of the 6th tested pile under lateral loads at the ground

| 桩顶水平力/kN | 桩顶实测位移/mm | 桩顶计算位移/mm | 绝对误差/mm | 相对误差/% | 文献[1] m 值/(MN·m ⁻⁴) |
|----------|-----------|-----------|---------|--------|-----------------------------------|
| 10 | 0.812 | 0.606 | -0.206 | -25.37 | 8.96 |
| 20 | 1.480 | 1.354 | -0.126 | -8.51 | 11.10 |
| 30 | 1.970 | 2.259 | 0.289 | 14.67 | 13.56 |
| 40 | 3.172 | 3.339 | 0.167 | 5.26 | 9.89 |
| 50 | 4.830 | 4.609 | -0.221 | -4.58 | 7.12 |

由表 1 可知,按本文引入初始地基比例系数的 p - y 曲线理论计算的 2# 试桩顶水平位移与实测位移最大绝对误差为 0.118 mm。由表 2 可知,按本文理论计算的 3# 试桩顶水平位移与实测位移最大绝对误差为 0.089 mm。由表 3 可知,按本文理论计算的 6# 试桩顶水平位移与实测位移最大绝对误差为 0.289 mm。



注: × 系列1 ▲ 系列2 --- 多项式(系列1) 多项式(系列2)

图 3 6# 试桩地面桩身水平力-水平位移关系曲线

Fig. 3 The relationship of the horizontal loads and the lateral displacement of the 6th tested pile at the ground

由图 1~3 可知,2#、3#、6# 试桩地面处桩身水平位移-水平荷载实测曲线呈良好的二次抛物线关系,按本文 p - y 曲线计算的地面处桩身水平位移-水平荷载曲线亦呈良好的二次抛物线关系。本文基于 m 法的双曲线型 p - y 曲线计算的地面桩身水平位移与实测值吻合良好。

对比图 1、图 2、图 3 可知,2# 桩和 6# 桩周土非线性特征基本一致;而 3# 桩周土非线性特征更显著,其位移特征值亦更小。

4 验证案例二

按文献[17]的预应力管桩水平承载力试验,现场自上而下依次为素填土、淤泥、粉质粘土(流塑-软塑)、粉质粘土(可塑)、全风化页岩、强风化页岩、中风化页岩、全风化混合岩、强风化混合岩、中风化混合岩。预应力管桩直径 0.4 m、桩长 30 m,持力层为强风化页岩或强风化混合岩。

基桩计算抗弯刚度值为 32.044 2 MN·m²。9 001# 桩第 1 级水平力的实测位移值反算得第 1 级水平力荷载对应的地基比例系数为 14 MN/m⁴,初始地基比例系数 m_0 取其 1.2 倍,16.8 MN/m⁴,试算得 $y_{L1} = 24$ mm。9 002# 桩加荷至 225 kN 时断桩破坏,本文取极限荷载的 0.7 倍之前(即 150 kN)的实测数据分析,第 1 级水平力的实测位移值反算得第 1 级水平力荷载对应的地基比例系数为 36 MN/m⁴,初始地基比例系数 m_0 取其 1.2 倍,为 43.2 MN/m⁴, $y_{L1} = 4$ mm。地面处桩身实测位移和计算位移如表 4、图 4 和图 5。由图 4、图 5 可知,地面处桩身桩身实测位移和计算位移吻合良好,且与水平荷载呈良好的二次抛物线关系。

对比图 4 和图 5 可知,9002# 桩周土非线性比 9001# 桩周土非线性更显著,其位移特征值亦更小。

表 4 水平荷载下地面处桩身计算位移及实测位移

Table 4 The calculated and the measured lateral displacement of the 9001st and 9002nd tested piles under lateral loads at the ground

| 桩顶水平力/kN | 9001# 桩桩顶位移 | | | 9002# 桩桩顶位移 | | |
|----------|-------------|-------|-------|-------------|-------|-------|
| | 实测/mm | 计算/mm | 误差/% | 实测/mm | 计算/mm | 误差/% |
| 25 | 3.13 | 2.93 | -6.27 | 1.79 | 1.81 | 1.34 |
| 50 | 6.39 | 6.11 | -4.38 | 4.45 | 4.10 | -7.92 |
| 75 | 10.13 | 9.54 | -5.82 | 7.10 | 6.91 | -2.69 |
| 100 | 13.06 | 13.23 | 1.33 | 10.11 | 10.31 | 1.95 |
| 125 | 16.47 | 17.20 | 4.45 | 13.78 | 14.34 | 4.04 |
| 150 | 20.90 | 21.46 | 2.66 | 19.03 | 19.09 | 0.34 |

140 kN。本文仅取试桩开裂前的试验数据进行分析。

按 HP-1# 桩第 1 级水平力的实测位移值反算得第 1 级水平力荷载对应的地基比例系数为 307.7 MN/m⁴, 初始地基比例系数 m_0 按其 1.4 倍选取, 则为 430.78 MN/m⁴, 试算可得 $y_L = 3/50$ mm。按 HP-2# 桩第 1 级水平力的实测位移值反算得第 1 级水平力荷载对应的地基比例系数为 1 421 MN/m⁴, 初始地基比例系数 m_0 按其 1.4 倍选取 1 989.4 MN/m⁴, 试算可得 $y_L = 3/25$ mm。

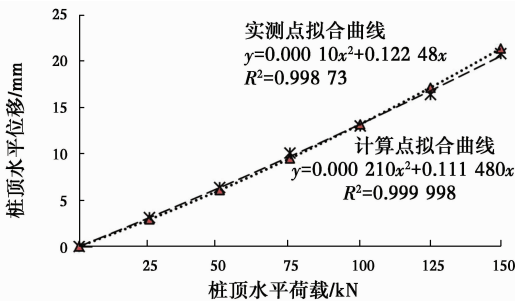
地面处桩身位移实测值和按本文 p - y 曲线法计算值如表 5、图 6 和图 7。由图 6、图 7 可知, 地面处桩身实测位移和计算位移吻合良好, 且与水平荷载呈良好的二次抛物线关系。

对比图 6 和图 7 可知, HP-1# 桩周土非线性特征比 HP-2# 桩周土非线性特征更为明显, 其位移特征值亦更小。

表 5 水平荷载下地面处桩身计算位移及实测位移

Table 5 The calculated and the measured lateral displacement of the HP-1st and HP-2nd tested piles under lateral loads at the ground

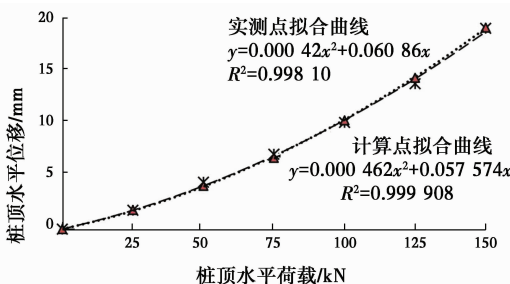
| 水平力/kN | HP-1# 桩桩顶位移 | | | HP-2# 桩桩顶位移 | | | |
|--------|-------------|-------|-------|-------------|-------|-------|--------|
| | 实测/mm | 计算/mm | 误差/% | 实测/mm | 计算/mm | 误差/% | |
| 10 | 0.05 | 0.050 | 0.29 | 20 | 0.04 | 0.036 | -10.85 |
| 20 | 0.12 | 0.121 | 1.24 | 40 | 0.08 | 0.078 | -3.02 |
| 30 | 0.22 | 0.218 | -0.89 | 60 | 0.13 | 0.126 | -2.83 |
| 40 | 0.35 | 0.344 | -1.79 | 80 | 0.18 | 0.182 | 1.35 |
| 50 | 0.52 | 0.502 | -3.37 | 100 | 0.25 | 0.246 | -1.41 |
| | | | | 120 | 0.33 | 0.319 | -3.34 |
| | | | | 140 | 0.4 | 0.401 | 0.13 |



注: * 实测位移 ▲ 计算位移
 --- 多项式(实测位移) 多项式(计算位移)

图 4 9001# 试桩地面桩身水平力-水平位移关系曲线

Fig. 4 The relationship of the horizontal loads and the lateral displacement of the 9001st tested pile at the ground



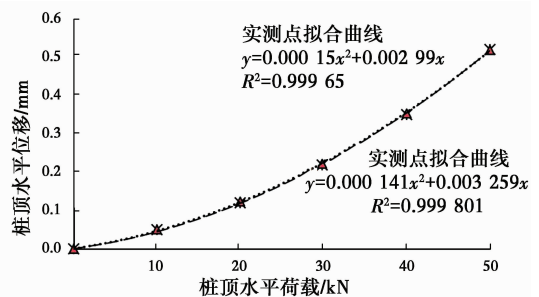
注: * 实测位移 ▲ 计算位移
 --- 多项式(实测位移) 多项式(计算位移)

图 5 9002# 试桩地面桩身水平力-水平位移关系曲线

Fig. 5 The relationship of the horizontal loads and the lateral displacement of the 9002nd tested pile at the ground

5 验证案例三

按文献[18], 某试桩直径 0.8 m, 桩长 24 m, 混凝土标号为 C20, 采用慢速维持法进行水平承载力试验, HP1 开裂荷载为 50 kN, HP2 桩开裂荷载为



注: * 实测位移 ▲ 计算位移
 --- 多项式(实测位移) 多项式(计算位移)

图 6 HP-1# 试桩地面桩身水平力-水平位移关系曲线

Fig. 6 The relationship of the horizontal loads and the lateral displacement of the HP-1st tested pile at the ground

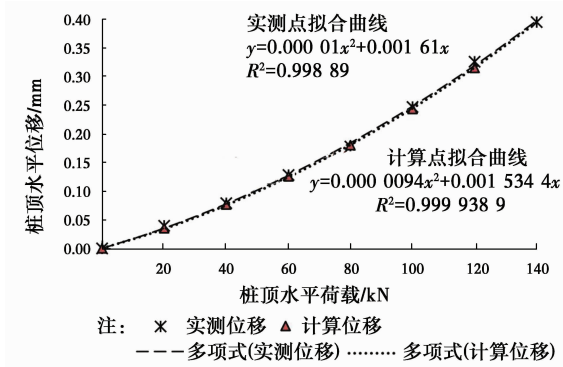


图 7 HP-2# 试桩地面桩身水平力-水平位移关系曲线
Fig. 7 The relationship of the horizontal loads and the lateral displacement of the HP-2nd tested pile at the ground

6 分析算例四——基桩受力性能

假定在算例一中的 3# 桩桩顶施加 2 700 kN 的竖向荷载,并假定桩端竖向力为桩顶的 1/3,并按线

表 6 按 m 法和本文 p - y 曲线法计算的 3# 基桩内力位移最大值及最大桩侧土压力
Table 6 the maximum moment, shear, soil pressure and the displacement of the 3rd tested pile at the ground by m-method and by p - y curve method

| 水平荷载/ kN | 不计轴力影响 | | | | | | 计入轴力 P - Δ 效应影响 | | | | | | | | | | | |
|-------------|----------------|---------------|-----------|-------------|------------|-----------|--------------------------|---------------|-----------|-------------|------------|-----------|------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|
| | M_{\max} | | | p_{\max} | | | M_{\max} | | | p_{\max} | | | V_0 | | | $F_{Q\max}$ | | |
| | m 法/ (kN·m) | 本文/ (kN·m) | 相对 差/% | m 法/ kPa | 本文/ kPa | 相对 差/% | m 法/ (kN·m) | 本文/ (kN·m) | 相对 差/% | m 法/ kPa | 本文/ kPa | 相对 差/% | m 法/ mm | 本文/ mm | 相对 差/% | m 法/ kN | 本文/ kN | 相对 差/% |
| 20 | -17.93 | -19.97 | 11.39 | 13.38 | 13.47 | 0.71 | -18.74 | -21.07 | 12.42 | 13.76 | 13.87 | 0.81 | 0.617 | 0.708 | 14.83 | 20.96 | 21.09 | 0.60 |
| 30 | -29.06 | -32.17 | 10.70 | 18.57 | 19.78 | 6.49 | -30.6 | -34.18 | 11.70 | 19.18 | 20.41 | 6.42 | 1.174 | 1.231 | 4.84 | 31.7 | 31.83 | 0.41 |
| 40 | -40.16 | -45.77 | 13.97 | 23.87 | 25.92 | 8.57 | -42.46 | -49.00 | 15.39 | 24.72 | 26.80 | 8.40 | 1.75 | 1.889 | 7.96 | 42.44 | 42.65 | 0.50 |
| 50 | -52.56 | -60.72 | 15.53 | 28.51 | 31.82 | 11.60 | -55.86 | -65.51 | 17.27 | 29.61 | 33.01 | 11.50 | 2.52 | 2.703 | 7.27 | 53.36 | 53.70 | 0.64 |
| 60 | -67.71 | -76.97 | 13.68 | 31.86 | 37.59 | 17.99 | -72.63 | -83.71 | 15.25 | 33.3 | 39.05 | 17.26 | 3.769 | 3.692 | -2.04 | 64.69 | 64.91 | 0.34 |
| 70 | -80.64 | -94.47 | 17.15 | 36.41 | 43.17 | 18.58 | -86.77 | -103.58 | 19.37 | 38.12 | 45.03 | 18.13 | 4.689 | 4.877 | 4.01 | 75.72 | 76.16 | 0.58 |

注:地基比例系数 m 值同表 2; M_{\max} 为桩身最大弯矩; p_{\max} 为桩侧最大土压力; V_0 为地面处桩身位移; $F_{Q\max}$ 为最大剪力。

由表 6 可知,不计轴力影响时,按本文 p - y 曲线法计算的桩身最大弯矩和最大桩侧土压力均比 m 法计算结果显著增大;桩顶水平荷载为 20 kN 时,桩身最大弯矩结果增大了 11.39%,桩侧最大土压力增加了 0.71%;桩顶水平荷载为 70 kN 时,桩身最大弯矩结果增大了 17.15%,桩侧最大土压力增加了 18.58%。

计入轴力 P - Δ 效应后,按本文 p - y 曲线法计算的桩身最大弯矩和最大桩侧土压力均比 m 法计算结果显著增大;桩顶水平荷载为 20 kN 时,桩身最大弯矩结果增大了 12.42%,桩侧最大土压力增加了 0.81%,桩顶水平位移增加了 14.83%,而桩身最大剪力略增加了 0.6%;桩顶水平荷载为 70 kN 时,桩

性递减。地基比例系数值按文献[1]中取值,如表 2。初始地基比例系数 $m_0=64 \text{ MN/m}^4$ 。 $y_L=0.526 \text{ mm}$ 。按本文 p - y 曲线及 m 法的基桩计算结果如表 6 和图 8。

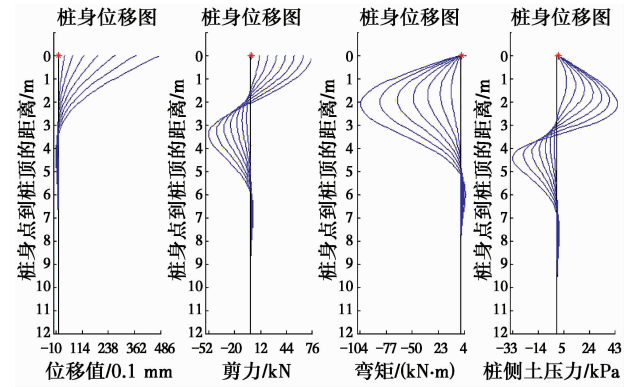


图 8 计入轴力影响时基于 p - y 曲线法的基桩计算结果

Fig. 8 P - Δ effect analysis of the tested pile by p - y curve method

身最大弯矩结果增大了 19.37%,桩侧最大土压力增加了 18.13%,桩顶水平位移增加了 4.01%,而桩身最大剪力略增加了 0.58%。

综上所述,计入桩侧土非线性后,桩身最大弯矩、桩侧最大土压力显著增加,但桩身最大剪力仅略微增加。工程实际中 m 法计算的基桩最大弯矩偏小,本文建议 m 法计算的基桩最大弯矩设计值乘以 1.05~1.25 的系数,以计入地基土非线性影响。

7 结论

从宏观应用角度出发,提出了基于 m 法的双曲线型 p - y 曲线,经算例证分析,主要结论如下:

1) 从宏观角度提出了基于 m 法的双曲线型 p - y

曲线,即 $p = \frac{y_L}{y_L + y} m_0 z y$,沿袭了地基比例系数概念,其所含初始地基比例系数、位移特征值等参数少,易于被工程技术人员接受。3 个不同场地 7 根试桩实测位移与基于本文 p - y 曲线法的计算位移吻合良好,验证了本文 p - y 曲线的合理性。

2)3 个不同场地 7 根试桩中加荷至开裂弯矩前,其地面处桩身实测水平位移与水平荷载关系曲线呈良好的二次抛物线关系。基于本文 m 法的双曲线型 p - y 曲线计算的地面处桩身位移-水平荷载关系曲线亦呈良好的二次抛物线关系。

3)建议初始地基比例系数取基桩第 1 级水平承载力实测值反算所得的地基比例系数的 1.2~1.6 倍,或按基桩第 1~3 级水平承载力实测值反算所得的地基比例系数均值的 1.2~1.6 倍;位移特征值主要和桩周土非线性特征有关,其大小反应了桩周图非线性特征大小,非线性特征越显著则位移特征值愈小,非线性特征越小则位移特征值愈大,当趋于线性时位移特征值理论值趋无穷大。

4)计入地基土非线性后,桩身最大弯矩、桩侧最大土压力显著增加,但桩身最大剪力仅略微增加。可见,m 法计算的桩身最大弯矩偏小,建议工程实际中采用 m 法计算基桩最大弯矩乘以 1.05~1.25 的系数,以计入地基土非线性影响。

参考文献:

- [1] 徐和,徐敏弱,郑春生. 单桩横向承载力试验研究[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(3):27-42.
XU H, XU M R, ZHENG C S. Tests on single pile lateral load capacity [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 14(2): 68-81. (in Chinese)
- [2] MATLOCK H S. Correlation for design of laterally loaded pile in soft clay [C]//Proceedings of 2nd Offshore Technology Conference, Houston: [s. n.], 1970.
- [3] REESE L C, COX W R, KOOP F D. Field testing and analysis of laterally loaded piles in stiff clay [C]//Proceedings of 7th Offshore Technology Conference, Houston: [s. n.], 1975.
- [4] STEVENS J, AUDIBERT J. Re-examination of p - y curve formulations [C]//Proceedings of 11th Offshore Technology Conference, Houston: [s. n.], 1979.
- [5] 王惠初, 武冬青, 田平. 黏土中横向静载桩 P - Y 曲线的一种新的统一法[J]. 河海大学学报, 1991, 19(1): 9-17. WANG H C, WU D Q, TIAN P. A new unified

method of P - Y curve for laterally loaded pile groups in plasticity soil [J]. Journal of Hohai University, 1991, 19(1): 9-17. (in Chinese)

- [6] 田平, 王惠初. 黏土中横向周期性荷载桩的 P - Y 曲线统一法[J]. 河海大学学报, 1993, 21(1): 9-14.
TIAN P, WANG H C. A unified method of P - Y curve for laterally and circularly loaded pile in plasticity soil [J]. Journal of Hohai University, 1993, 21(1): 9-14. (in Chinese)
- [7] 王腾, 王天霖. 粉土 p - y 曲线的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1343-1346.
WANG T, WANG T L. Experimental research on silt p - y curves [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1343-1346. (in Chinese)
- [8] 戚春香, 王建华. 弱饱和和土层中桩的双曲线型 p - y 曲线[J]. 天津大学学报, 2010, 20(3): 215-220.
QI C X, WANG J H. Hyperbolic p - y curve of pile in saturated degradation strata [J]. Journal of Tianjin University, 2010, 20(3): 215-220. (in Chinese)
- [9] 王国粹, 杨敏. 砂土中水平受荷桩非线性分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 261-267.
WANG G C, YANG M. Nonlinear analysis of laterally loaded piles in sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 261-267. (in Chinese)
- [10] 李雨润, 袁晓铭, 梁艳. 桩-液化土相互作用 p - y 曲线修正计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 595-599.
LI Y R, YUAN X M, LIANG Y. Modified calculation method of p - y curves for liquefied soil-pile interaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 595-599. (in Chinese)
- [11] 凌贤长, 唐亮. 液化场地桩基侧向响应分析中 p - y 曲线模型研究进展[J]. 力学进展, 2010, 40(3): 250-261.
LING X C, TANG L. Recent advance of p - y curve to model lateral response of pile foundation on liquefied ground [J]. Advances in Mechanics, 2010, 40(3): 250-261 (in Chinese)
- [12] 刘红军, 西国庚, 马明泊. 可液化土 p - y 曲线模型折减方法的研究进展[J]. 中国海洋大学学报, 2015, 45(7): 107-112.
LIU H J, XI G G, MA M P. Recent Advance of Reduction methods on p - y curves in liquefiable soil [J]. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45(7): 107-112. (in Chinese)
- [13] 楼晓明, 吴昊, 黄江枫. 基于 p - y 曲线确定饱和黏性土的地基比例系数[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2206-2212.
LOU X M, WU H, HUANG J F. Determination of

- slope coefficient of subgrade reaction of saturated clay based on $p-y$ curve [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2206-2212. (in Chinese)
- [14] 刘红军, 马明泊, 吕小辉, 等. 黄河水下三角洲快速沉积粉土层桩基 $p-y$ 曲线试验研究[J]. 中国海洋大学学报, 2015, 45(10): 81-87.
LIU H J, MA M P, LYU X H, et al. Experimental study on $p-y$ curve of rapidly deposited silt in the subaqueous Yellow River delta [J]. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45(10): 81-87. (in Chinese)
- [15] 赵明华, 李微哲, 单远铭, 等. 成层地基中倾斜荷载桩改进有限杆单元法研究[J]. 工程力学, 2008, 25(5): 79-85.
ZHAO M H, LI W Z, SHAN Y M, et al. Behavior analysis of piles in layered clays under eccentric and inclined loads by improved finite pole element method [J]. Engineering Mechanics, 2008, 28(5): 79-85. (in Chinese)
- [16] 赵明华, 李微哲, 曹文贵. 复杂荷载及边界条件下基桩有限杆单元方法研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1059-1064.
ZHAO M H, LI W Z, CAO W G. Study on applying finite pole element method to analysis of piles under complex loads with different boundary restraints [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1059-1064. (in Chinese)
- [17] 朱维平, 徐志山. 预应力高强混凝土管桩水平承载力试验研究[J]. 建筑结构, 2012, 42(Sup1): 847-849
ZHU W P, XU Z S. Experimental study on horizontal bearing capacity of prestressed high-intensity concrete pipe pile [J]. Building Structure, 2012, 42(Sup1): 847-849. (in Chinese)
- [18] 朱彦鹏, 王秀丽, 张安疆, 等. 人工灌注桩水平承载力的试验研究[J]. 工程力学, 1997, 14(Sup): 493-500.
ZHU Y P, WANG X L, ZHANG A J, et al. Experimental study on horizontal bearing capacity of artificial pile [J]. Engineering Mechanics, 1997, 14(Sup): 493-500. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)