

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.10.019

基于应力增量的单桩 p - y 曲线分析方法

李洪江^{1,2}, 刘松玉^{1,2}, 童立元^{1,2}

(1. 东南大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学 江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘 要: p - y 曲线研究进展一直缓慢, 究其原因是缺乏一套成熟的理论体系作支撑。通过考虑桩侧土的实际应力状态, 引入 Vesic 圆孔扩张理论对水平受荷桩 p - y 曲线进行研究, 建立了新的基于应力增量的 p - y 曲线分析方法。该方法综合考虑了桩侧土体径向应力增量、纵向应力增量效应及桩体深层转动挠曲对水平土抗力的贡献, 是一种考虑多种因素的 p - y 曲线解, 可适用于不同桩型条件下的单桩受力分析。算例结果表明: 基于应力增量的 p - y 曲线分析方法在水平受荷桩应用中赋有很好的正确性和准确性, 较 Reese 法、API 法和 Kim 法对大变形问题有更高计算精度。以上研究成果对 p - y 曲线的发展及深入研究具有重要意义。

关 键 词: p - y 曲线; 应力增量; 水平受荷桩; 圆孔扩张; 大变形

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017) 10-2916-08

A method for p - y curve of a single pile based on stress increment

LI Hong-jiang^{1,2}, LIU Song-yu^{1,2}, TONG Li-yuan^{1,2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering & Environmental Safety, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: Due to the lack of mature theoretical system, the research progress of p - y curve is slow. With the consideration of the actual stress state of foundation soil and deployment of Vesic expansion theory, a new method for analysis of p - y curve based on stress increment is developed. This method combines the contributions of soil radial stress increment, longitudinal stress increment effect and deep rotation angle of pile to the horizontal soil resistance. It is a type of solution of p - y curve considering various factors. The method can be applied to different type of piles. The case results show that this method is correct and accurate in analyzing the behavior of laterally loaded pile. It produces better precision in large deformation analysis than Reese, API and Kim methods. The above research result is of great significance for in-depth study of the p - y curve development.

Keywords: p - y curve; stress increment; lateral pile; cavity expansion; large deformation

1 引 言

桩基础是建筑、海洋、交通等领域最常见的基础型式之一, 其水平荷载下的受力变形和地基土响应分析是其设计的重要内容。桩侧地基土的非线性、成层性、弹塑性成为水平受荷桩的设计难点, 也是制约其快速发展的核心问题。国内规范通常采用 m 法对水平受荷桩进行设计, 而 m 法在桩顶水平位移较小的情况下能较好地反映桩的受力变形特性, 在桩身水平位移较大, 桩侧土体进入非线性弹塑状态

时, 其计算结果与实测结果存在差异, 且该差异随施加荷载的增大而逐渐增大^[1]。目前, 国际上的主流方法为 p - y 曲线法, p - y 曲线法也被认为是最有效的水平受荷桩大变位分析方法, 它综合反映桩-土相互作用的复杂性和非线性, 已在诸多工程中得以应用。表 1 列举了国内外几种典型的 p - y 曲线模型, 由于影响参数众多, p - y 曲线模型完整的计算展开式都较为复杂, 这也是水平受荷桩承载力确定的难点之所在。 p - y 曲线法的另一个难点在于土抗力 p 和水平位移 y 较难通过试验测准, 直接测量深

收稿日期: 2016-02-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(No. 2016YFC0800201); 江苏省建设系统科技项目资助(No. 2014ZD66); 中央高校基本科研业务费专项资金资助和江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(No. KYLX16_0244)。

This work was supported by the National Key Research Projects of China (2016YFC0800201), the Construction Science and Technology Research Project of Jiangsu Province (2014ZD66), the Fundamental Research Funds for the Central Universities and the Graduate Student Scientific Research Innovation Program of Jiangsu Province (KYLX16_0244).

第一作者简介: 李洪江, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事桩基础与地下结构工程方面研究。E-mail: lihongjiang55@126.com

层桩侧土的水平位移又较难实现。

从表 1 可知, 国内外已有的 p - y 曲线模型, 大多为拟合曲线全量模型, 是根据试验结果直接给出或分段给出土抗力 p 与水平位移 y 的关系。而反映水平受荷桩桩-土相互作用的 p - y 曲线是一种典型的非线性曲线, 因此, 基于应力增量的表达形式更能对其规律进行精确描述。根据调研, 从应力增量

角度描述 p - y 曲线的研究较少, 可参阅的文献也鲜见。本文以 Vesic 圆孔扩张塑性理论为基础, 考虑桩侧土的实际应力状态建立了水平受荷桩 p - y 曲线的应力增量分析方法, 并基于应力增量法求得了一种 p - y 曲线统一解, 通过实例对比分析, 验证了基于应力增量单桩 p - y 曲线分析方法的正确性和准确性。

表 1 几类典型的 p - y 曲线
Table 1 Several kinds of typical p - y curves

国外			国内		
文献来源	p - y 曲线表达式	模型说明	文献来源	p - y 曲线表达式	模型说明
Kondner (1963) ^[2]	$p = \frac{y}{\frac{1}{k} + \frac{y}{p_u}}$	双曲线模型, 适用砂性土, p_u 取 p_{us} 与 p_{ud} 中较小值	高明等 (1988) ^[8]	$p = \eta p_u y (y + y_0)^{-1}$	基于饱和砂模型试验, η 为修正系数 $y_0 = p_u / (k_i d_p)$
Matlock (1970) ^[3]	$\begin{cases} p = 0.5 p_u \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{\frac{1}{3}} & (y < 8 y_{50}) \\ p = p_u & (y > 8 y_{50}) \end{cases}$	分段型函数, 适用软黏土, y_{50} 为极限抗力一半时的桩水平位移	王惠初等 (1991) ^[9]	$p = \begin{cases} \frac{y / y_{50}}{a + b y / y_{50}} p_u, & y \leq \beta y_{50} \\ p_u, & y > \beta y_{50} \end{cases}$	由土本构关系导出, 既适用软黏土也适用硬黏土
Reese 等 (1975) ^[4]	$p_u = \min \begin{cases} 11 c_u B \\ (2 + \gamma z / c_{avg} + 2.83 z / B) c_{avg} B \end{cases}$	分段函数, 适用硬黏土, c_{avg} 为从地表到 5 倍桩径深度的 c_u 平均值	章连洋等 (1992) ^[10]	$p = \begin{cases} [F_x + (1 - F_x)x / x_i] p_u, & x \leq x_u \\ p_u, & x > x_u \end{cases}$	分段函数, 适用黏性土, 基于镇江大港现场试桩资料
Scott (1980) ^[5]	$p_k = \frac{nk_0 \gamma z d}{\sqrt{1/\sin \phi + 1/(3-4\nu)}}$	适用砂性土, 基于离心机试验的双折线模型	王腾等 (2009) ^[11]	$p = 1.26 p_u \tanh \left(\frac{kz}{p_u} y \right)$	据黄河粉土, 小尺度模型钢管桩
API 规范 (1989) ^[6]	$p = \Psi p_u \tanh \left[\frac{kz}{\Psi p_u} y \right]$	双曲正切型, 适用砂性土, 应用较为普遍, 其中, $\Psi = (3-0.8z/B) \geq 0.9$	李雨润等 (2009) ^[12]	$p = \frac{A \alpha p_u \exp[2\beta K(\phi)hx / (A \alpha p_u)] - 1}{\exp[2\beta K(\phi)hx / (A \alpha p_u)] + 1}$	依据 API 规范进行双参数修正, 针对可液化土
Kim 等 (2004) ^[7]	$p = \frac{y}{\frac{1}{k_{im}} + \frac{y}{p_u}}$	双曲线型, 适用砂性土, 基于小比例尺模型获得	黄茂松等 (2014) ^[13]	$p = 2r_0 N c_m \left(\beta \frac{y - p/k'}{r_0} \right)$	适于黏性土, 考虑了加载应变路径, 完整表达式较复杂

注: 各符号含义参见原文献。

2 机制的描述

2.1 水平受荷桩承载机制

水平受荷桩承载问题是一个复杂的桩-土相互作用问题。它的设计要点是要充分把握桩体变位过程中地基土的应力发挥水平, 并控制桩顶位移值不超过许可位移值或桩身应力不大于许可应力。图 1 为水平受荷桩(刚性、柔性)变形机制示意图, 水平受荷桩在侧向移动、转动过程中, 桩侧地基土的径向应力、纵向应力均有增加, 在地基土未发生极限破坏以前, 土体一直处于非线性弹塑性挤压状态。伴随桩顶水平力的施加, 桩侧地基土的塑性影响区不断扩展, 桩侧土对桩体的水平反力沿深度方向将发生重分布。当水平荷载大于极限荷载后, 桩顶水平位移及位移梯度显著增加, 同时伴随桩侧土的挤压隆起和被动破裂面的出现。对于还受桩身强度控制的桩体(如灌注桩), 往往又伴随着桩身混凝土的破碎或桩体的折断现象。

另外, 水平承载过程中刚性桩桩身几乎不出

现挠曲变形, 表现为桩身绕转动中心转动而产生水平位移, 柔性桩变形机制与刚性桩不同, 其桩身同时存在侧向位移和较大挠曲变形。单桩承载过程中的深层水平位移和桩侧土抗力是 p - y 曲线的核心, 以下将运用 Vesic 圆孔扩张理论对水平受荷桩的承载变形问题展开分析, 并建立基于应力增量的单桩 p - y 曲线模型。

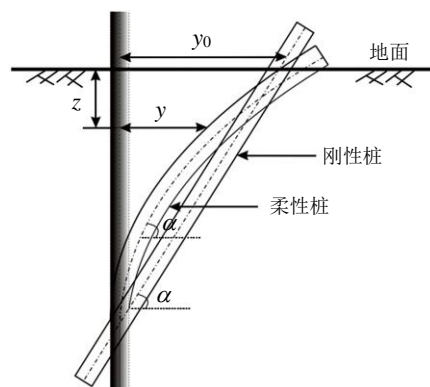


图 1 水平受荷桩机制示意

Fig.1 Horizontal bearing mechanism of a single pile

2.2 Vesic 圆孔扩张与桩侧土变形发展

圆孔扩张理论最早于 1945 年由 Bishop 等提出用于解决金属压痕问题, 此后 Gibson 等于 1961 年将其应用于岩土力学问题中, Vesic 于 1972 年给出可压缩弹塑性土的圆孔扩张问题基本解^[14-15]。在圆孔扩张理论发展过程中, Vesic 是有力推动者和继承者, 他率先将这一理论应用于深基础承载力方面研究, 从孔变形、孔周土屈服范围、圆孔扩张应力等方面研究了地基土体响应规律。Vesic 圆孔扩张理论假定土体为弹塑性材料, 屈服准则服从 Mohr-Coulomb 准则或 Tresca 屈服准则, 分别按塑性影响区和弹性影响区综合对土体扩张变形进行分析, 并重点研究土体在塑性扩张变形过程中的应力增长问题。同时, 圆孔扩张理论突破了传统弹性力学中对变形为小变形的限制, 作为塑性扩张理论又使其能应对地基土发生塑性大变形的情况。

对于水平受荷桩与桩侧土相互作用问题, 桩侧土同时存在挤压塑性区、弹性区两个区域。严格意义上讲, 由于桩-土接触面的存在, 在桩基水平运动过程中, 受影响区域内的桩侧土在水平尺度上不是一个从弹性逐渐过渡到塑性的变化, 而是一个从接触面塑性到塑性区扩展、弹性区后移、直至极限剪切破坏的过程, 其变形破坏过程是一个压-剪耦合过程。如图 2 所示, 在桩-土相互作用过程中, 由于接触面土体弹性位移无限小, 桩-土接触面土体迅速进入塑性阶段, 在大多数土体中, 土体塑性屈服会在一个非常小的应变下发生, 因此, 这个假设是合理的^[15]。桩侧土影响区域同时存在塑性区和弹性变形区, 且塑性区沿接触面向外逐渐扩张, 用塑性扩张理论更能准确地描述桩侧土抗力与水平位移的关系, 这恰与 Vesic 圆孔扩张理论相符合, 圆孔扩张理论给出的塑性区应力增量表达式为^[16]

$$\text{径向应力增量 } \Delta\sigma_r = 2C_u \ln\left(\frac{R_p}{r_\Delta}\right) + C_u \quad (1)$$

$$\text{纵向应力增量 } \Delta\sigma_z = 2C_u \ln\left(\frac{R_p}{r_\Delta}\right) \quad (2)$$

其中, 塑性影响区半径为

$$R_p = r_0 \sqrt{\frac{E}{2(1+\mu)C_u}} \quad (3)$$

式中: E 为土体弹性模量 (kPa); μ 为泊松比, 由室内三轴试验获得; C_u 为土体不排水抗剪强度 (kPa); r_0 为桩径 (m); r_Δ 为离开扩孔中心线的距离 (m)。

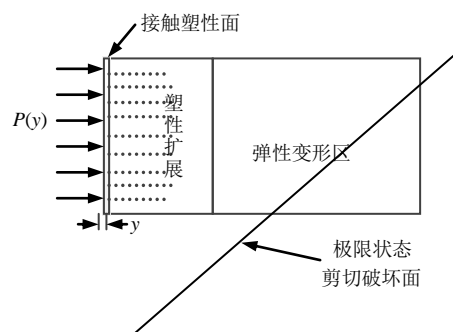


图 2 桩侧土变形发展过程

Fig.2 Development process of soil deformation

3 基于应力增量的 p - y 曲线模型

3.1 分析思路

以往对圆孔扩张理论的应用仅仅局限在沉桩、旁压试验、静力触探、隧道施工等问题上, 对运用圆孔扩张理论分析水平受荷桩的承载问题关注较少。

水平受荷桩在连续加载时, 桩侧土变形不可恢复, 伴随土体位移的增加, 受压一侧土体塑性区将沿接触面一直向外扩张。假定土体满足 Mohr-Coulomb 屈服准则, 将 Vesic 塑性区应力增量表达式中的 r_Δ 重新定义为伴随桩基水平移动而移动的点, 将该点取为 $r_\Delta = r_0$ 时即表征桩-土界面的应力增量, 即该点直接附着在桩表面。注意到, 经典圆孔扩张理论本身处理的问题是: 桩基尺寸可变, 扩孔中心线的位置不变, 按平面轴对称问题研究一定尺寸桩基柱形扩孔下的地基土应力变化, 按照式 (3) 桩基尺寸一定, 则塑性影响区半径 R_p 一定。

对于水平受荷桩, 桩基发生水平变位时, 原有孔穴也会得到扩张, 扩张方向仅为沿桩基运动方向的单侧孔穴扩张。水平受荷桩要解决的问题是: 桩基尺寸不变, 扩孔中心线的位置改变, 扩孔中心线的位置由桩基移动位置决定, 地基土应力增量的大小也完全依赖于桩基的位置。亦即桩基在每个位置处均可看作一次不规则的扩孔运动, 这种扩孔运动的扩孔中心线为变动的桩基轴线, 所研究的点为 $r_\Delta = r_0$ 的桩-土界面位置点 (表征界面处的土反力)。因此, 只要明确移动桩基各位置处的等效塑性区影响半径 R_p , 每一运动时刻下的桩侧地基土径向应力增量即可由 Vesic 圆孔扩张理论给出。

如图 3 所示, 点 A 为附着于桩-土接触面上, 表征桩侧土反力的点。由于 A 点在桩轴线和水平力作用方向的平面上, 所以 A 点在桩基运动过程中受到的土反力最大, 当 A 点土体达到被动极限平衡状态时, 这一点就发生挤压破坏。对于整个桩基的水

平运动, 桩基位置不断发生改变并侧向挤压土体, 当移动距离为 y 时 (见图 3(b)), 此时受压 A 点的地基土反力与单桩扩大直径 (由 $r_0 \rightarrow r$) 后对 A 点的力学效应一致。桩基直径扩大后, 由式 (3) 得新的塑性区影响半径为 R'_p , 而以运动后的桩基所在位置为扩孔中心, 塑性区半径则为 $R'_p - y$ 。至此, 发生水平运动的桩侧土体 ($r_\Delta = r_0$) 应力状态可由 Vesic 圆孔扩张理论得到解答, 式 (1) ~ (3) 改写为

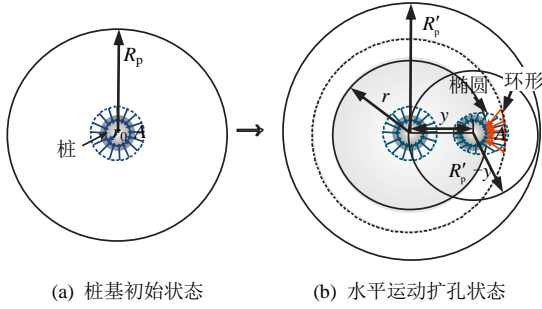


图 3 水平运动桩基的扩孔演化过程

Fig.3 Cavity expansion process of the horizontal motion pile

$$\left. \begin{aligned} \Delta\sigma_r &= 2C_u \ln \left(\frac{R'_p - y}{r_0} \right) + C_u \\ \Delta\sigma_z &= 2C_u \ln \left(\frac{R'_p - y}{r_0} \right) \\ R'_p &= r \sqrt{\frac{E}{2(1+\mu)C_u}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: y 为水平位移; r 为按等效扩孔原则对应的桩径, $r = r_0 + y$ 。

需要指出的是, 对于移动桩体的扩张运动, 在确定新的塑性区半径 $R'_p - y$ 后, 桩侧土反力按 Vesic 圆孔扩张理论以环形均布荷载形式作用于桩身上。而实际的水平受荷桩桩侧土反力应为近似椭圆形式分布 (见图 3(b)), 后续的实例对比验证表明, 这种仅对受压一侧土反力的椭圆分布进行环形分布替代是合理的, 可以保证很好地反映桩侧地基土水平抗力的发挥程度。

从桩基初始运动时刻 (见图 3(a)) 开始算起, 令 $\chi = \sqrt{\frac{E}{2(1+\mu)C_u}}$, 由式 (4) 得水平运动桩桩侧土体的径向应力增量为

$$\Delta\sigma_{r,1} = 2C_u \ln \left(\frac{\chi r - y}{r_0} \right) + C_u = \left\{ 1 + 2 \ln \left[\frac{\chi r_0 + (\chi - 1)y}{r_0} \right] \right\} C_u \quad (5)$$

式 (5) 中, 每一水平位移 y 对应下的土体径向应力增量即为所求土抗力 p 的主要来源之一。

3.2 纵向应力增量效应

以上仅给出了桩基水平移动下土体径向应力增量, 未考虑桩基的转动和纵向应力增量效应对水平抗力的贡献, 也未能反映土抗力与深度的关系, 无法反映地基土抗力随深度的变化规律。桩基在水平运动过程中, 除了径向应力 σ_r 增加外, 地基土纵向应力 σ_z 也会增加, 且常伴随主应力轴旋转的问题。如图 4 所示, 桩侧地基土变形是压缩效应和剪切效应共同作用的结果, 随着 σ_r 与 σ_z 应力比的增加, 土体压缩与剪切变形的相对比例不断发生调整, 同时土体的应力状态也不断发生改变, 两种效应产生的水平分力的叠加是桩侧土抗力的共同来源。以往传统的 p - y 曲线模型则多只是局限于径向应力改变对地基土抗力的影响, 未考虑纵向应力增加对水平抗力的贡献, 亦即无法反映土抗力沿深度方向的变化。

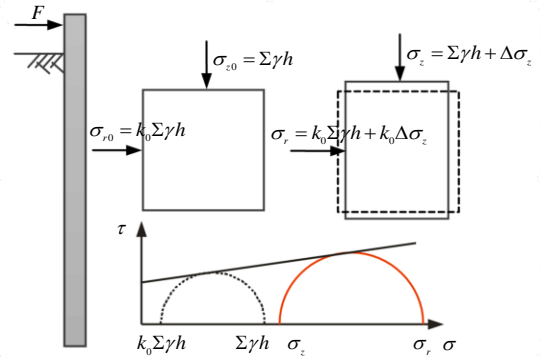


图 4 地基土应力状态随桩体运动的变化

Fig.4 Change of soil stress state with pile body movement

这里, 考虑桩侧土纵向应力改变对土抗力的贡献, 根据 Vesic 圆孔扩张理论, 结合式 (4) 给出水平运动桩的土体纵向应力增量表达式为

$$\Delta\sigma_z = 2C_u \ln \left(\frac{R'_p - y}{r_0} \right) = 2C_u \ln \left(\frac{\chi r - y}{r_0} \right) = 2 \ln \left[\frac{\chi r_0 + (\chi - 1)y}{r_0} \right] C_u \quad (6)$$

则由土体纵向应力增加而产生的径向应力增量为

$$\Delta\sigma_{r,2} = K(y) \Delta\sigma_z = 2K(y) \ln \left[\frac{\chi r_0 + (\chi - 1)y}{r_0} \right] C_u \quad (7)$$

式中: $K(y)$ 为地基土侧压力系数。

式 (7) 考虑了地基土纵向应力增量效应对土体

水平向应力分布的贡献,是桩侧土抗力 p 的又一重要贡献因素。

3.3 转动挠曲对水平抗力的贡献

在水平荷载和弯矩的作用下,桩身同时产生水平位移和转角。实际意义上,伴随桩体转动,桩侧土体应力状态发生改变,深部桩体转动挠曲引起的土抗力增加是 p - y 曲线计算中土抗力的重要组成部分。

再者,传统的 p - y 曲线认为深部桩体转动挠曲是微小的,对该作用引起的土抗力进行了忽略,因此,无法准确计算桩基大变位条件下的土抗力与位移关系。下面考虑桩体转动挠曲对周边地基土应力状态的改变,继续给出由于单位桩体转动效应而贡献的土体径向应力增量大小。

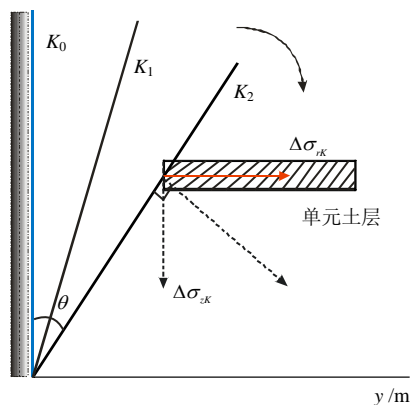


图5 单位桩体转动引起的侧向土压力变化
Fig.5 Change of lateral earth pressure with the pile rotation

如图5所示,桩侧土体初始土压力系数为 K_0 ,伴随单位桩体转角 θ 的增加,土体侧向压力系数不断发生改变,由于侧向土压力系数改变而增加的桩侧径向挤压应力为

$$\Delta\sigma_{rk} = \frac{dK(y)}{dy} (y - y_0) \gamma z \quad (8)$$

从初始转动时刻算起 ($y_0=0$),式(8)简化为

$$\Delta\sigma_{rk} = \frac{dK(y)}{dy} y \gamma z \quad (9)$$

因此,求得由桩体转动挠曲贡献的土体径向应力增量为

$$\Delta\sigma_{r,3} = \Delta\sigma_{rk} = \frac{dK(y)}{dy} y \gamma z \quad (10)$$

综上,桩侧土抗力 p 来源于3种作用效应的叠

加,可由式(5)、(7)、(10)3部分的应力增量表示为

$$p(y) = (\Delta\sigma_{r,1} + \Delta\sigma_{r,2} + \Delta\sigma_{r,3})D = 2\theta r_0 + 2r_0 K(y)(\theta - C_u) + 2r_0 \frac{dK(y)}{dy} y \gamma z \quad (11)$$

式中: $\theta = \{1 + 2\ln[\frac{\lambda r_0 + (\lambda - 1)y}{r_0}]\}C_u$; D 为单桩直径。

式(11)即为本文基于应力增量法获得的单桩 p - y 曲线计算模型,与传统 p - y 模型相比,该模型不依靠试验数据的拟合而获得。从式(11)来看,它综合反映了径向应力增量效应、纵向应力增量效应及桩体深层转动挠曲对 p - y 曲线的影响,可适于刚性桩、柔性桩水平承载特性分析,是一个考虑多种因素的 p - y 曲线统一解。式(11)由于同时考虑了纵向应力增量效应及桩体深层转动挠曲对水平土抗力的贡献,该计算模型又可以反映 p - y 曲线随土层深度的变化特征,并适于桩基水平大变形分析。

3.4 侧向土压力系数 $K(y)$

桩侧土体是一种复杂的弹塑性介质,在土体发生被动极限破坏之前,作用在水平受荷桩上的土压力是静止土压力与被动土压力之间的任一数值,梅国雄等^[17]给出了较好的考虑变形的朗肯土压力模型,式(11)计算模型中, $K(y)$ 采用梅国雄等^[17]提出的侧向土压力系数为

$$K(y) = \left(\frac{k}{1 + e^{-\frac{\ln A}{s_a} y}} - \frac{k-4}{2} \right) \frac{k_0}{2} \quad (12)$$

式中: $A = \frac{k_p - k_a}{k_p - 2k_0 + k_a}$; $k = \frac{4k_p}{k_0} - 4$; s_a 为达到主动土压力时的土体位移量,取 $0.01D$ ^[18]; k_0 、 k_a 、 k_p 分别为静止土压力系数、主动土压力系数和被动土压力系数,由土体的有效内摩擦角 φ' 计算。

则侧向土压力系数变化率为

$$\frac{dK(y)}{dy} = \frac{k_0 k \ln A \cdot A^{-\frac{y}{s_a}}}{2s_a (A^{-\frac{y}{s_a}} + 1)^2} \quad (13)$$

4 算例分析与验证

4.1 算例1

文献[19]开展了粉砂土地基中单桩水平大变位的1g室内模型试验,试验选用钱塘江粉砂质土,土粒相对密度为2.69,塑限为22.6,液限为31.7,含

水率为 32.5%。钢管桩直径为 114 mm，壁厚为 2.5 mm，桩长为 7 m，抗弯刚度 $EI=312 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ 。试验获得了一种较大水平变位下的单桩拟合 p - y 曲线，试验粉砂土处于弱排水条件。以下运用本文方法对试验桩 p - y 曲线进行对比计算，计算过程中涉及到的土体参数见表 2。

表 2 土体物理力学指标及土压力系数

Table 2 Physical and mechanical indices of soil and coefficients of earth pressure

γ /(kN/m^3)	φ' /($^\circ$)	μ	E /MPa	C_u /kPa	k_0	k_a	k_p	s_a /mm
17.5	28.5	0.34	2.2	13.3	0.523	0.361	2.770	1.14

图 6 给出了不同方法计算所得文献[19]泥面下 3 倍桩径处 p - y 曲线比较结果，由图可知，几类方法与试验结果均存在一定程度的偏差，相较言之，本文计算法较 Reese 法、API 法和 Kim 法更接近真实大变形下的受荷桩 p - y 曲线值，后 3 种方法明显低估了地基土的极限土抗力，且 Reese 和 API 法计算曲线初始刚度偏大。综合而言，本文提出的应力增量 p - y 曲线法可以较好地反映桩周土的水平土抗力特点及大变形条件下的桩-土相互作用关系，在大变形预测精度方面具有可靠性，较传统 Reese 法、API 法和 Kim 法预测精度具有明显优势，确保了本文 p - y 曲线法的可行性。

4.2 算例 2

为继续验证本文 p - y 曲线计算法对现场原型试桩水平承载特性的适用性，依托靖江市文化中心建设项目，在现场软土地区完成了一根直径为 1.0 m，桩长为 68 m 的灌注桩水平载荷试验。试验场地土层深厚，从上到下依次分布有①层素填土、②层粉质黏土、③层淤泥质粉质黏土、④层粉细砂、⑤层淤泥质粉质黏土、⑥层粉砂夹淤泥质粉质黏土等，桩基以⑪层中粗砂为持力层，具体试桩情况参见文献[20]。试桩过程中，于桩身桩侧分别埋设钢筋应力计和土压力盒获取桩身弯矩及桩周土抗力，继而获得土抗力与位移的关系。试桩加载点距泥面 0.1 m，最大加载控制位移为 6 mm，试验给出了第②层粉质黏土层中，距离泥面 1D、2D、3D、4D、5D 处的 p - y 曲线测试结果，土性参数见表 3，土体不排水抗剪强度指标 C_u 由原位十字板剪切试验给出。图 7 为各深度处本文 p - y 曲线计算值与试验结果的对比，可以看出，式 (11) 计算结果与试验值吻合良好，进一步验证了本文计算方法的准确性。

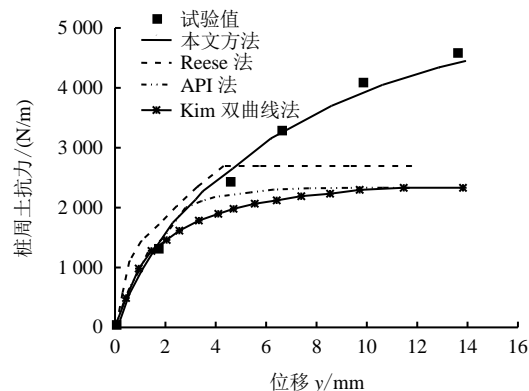


图 6 各类 p - y 曲线计算结果对比

Fig.6 Comparison of p - y curves computed using different methods

表 3 粉质黏土层土性参数

Table 3 Parameters of silty clay layer

距泥面深不同深度处 C_u /kPa					γ /(kN/m^3)	φ' /($^\circ$)	E /MPa	塑性 μ	液性 指数
1D	2D	3D	4D	5D				I_p	I_L
19.8	21.6	23.9	24.2	25.5	18.6	19.5	11.9	0.35	0.82

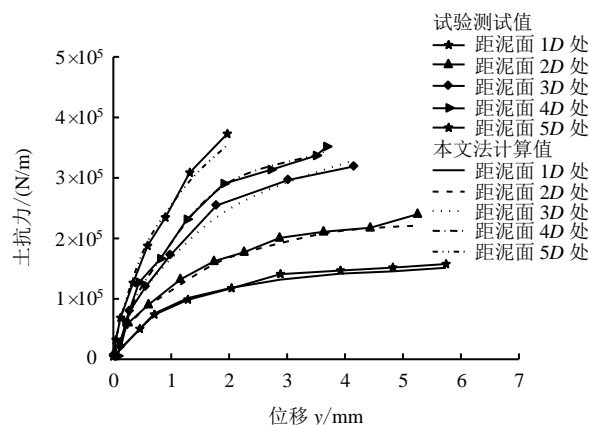


图 7 p - y 曲线计算结果与试验结果对比

Fig.7 Comparison of calculated and experimental p - y curves

5 结 论

(1) 以往水平受荷桩的 p - y 曲线大多是基于试验数据拟合获得，缺少理论支撑。本文通过引入经典 Vesic 圆孔扩张理论，考虑桩土接触面真实塑性应力状态，从理论上建立了统一的 p - y 曲线分析模型。该模型克服了传统 p - y 曲线的应用局限性和单一性，能综合反映径向应力增量效应、纵向应力增量效应及桩体深层转动挠曲对 p - y 曲线的影响。

(2) 本文基于应力增量的 p - y 曲线分析方法考虑了纵向应力增量和桩体深层转动挠曲对桩侧地基土抗力的贡献作用，可用于桩基的大变形分析，较 Reese 法、API 法和 Kim 法具有更高的计算精度。

(3) 面对如今复杂的桩型和承载环境, 仍沿用以往的 p - y 曲线进行设计是不足的, 本文基于应力增量的 p - y 曲线分析法具有更广泛的适用性, 试验验证表明, 该法具有很好的可行性和准确性。

参考文献

- [1] 马志涛. 水平荷载下桩基受力特性研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(5): 546—553.
MA Zhi-tao. Study on behavior of pile foundation under lateral loading[J]. **Journal of Hohai University (Natural Sciences)**, 2006, 34(5): 546—553.
- [2] KONDNER R L. Hyperbolic stress-strain response: Cohesive soils[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundations Division**, 1963, 89(1): 115—144.
- [3] MATLOCK H. Correlation for design of laterally loaded piles in soft clay[C]//Offshore Technology Conference. Houston, Texas: [s. n.], 1970: 77—94.
- [4] REESE L C, COX W R, KOOP F D. Field testing and analysis of laterally loaded piles on stiff clay[C]//Offshore Technology Conference. Houston, Texas: OTC Press, 1975.
- [5] SCOTT R F. Analysis of centrifuge pile tests: Simulation of pile driving[R]. Washington D C: American Petroleum Institute, 1980.
- [6] American Petroleum Institute. Recommended practice for planning, designing, and constructing fixed offshore platforms[M]. [S. l.]: American Petroleum Institute, 1989.
- [7] KIM B T, KIM N K, LEE W J, et al. Experimental load-transfer curves of laterally loaded piles in Nak-Dong River sand[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2004, 130(4): 416—425.
- [8] 高明, 陈锦珍, 郑国芳, 等. 桩在侧向静、动、循环荷载下的性能研究及 p - y 曲线建议公式[J]. 海洋工程, 1988, 6(3): 34—43.
GAO Ming, CHEN Jin-zhen, ZHENG Guo-fang, et al. Studies on behavior of lateral loaded piles under static, dynamic and cyclic loadings and proposal of p - y curve formulation[J]. **Journal of the Ocean Engineering**, 1988, 6(3): 34—44.
- [9] 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 Hui-chu, WU Dong-qing, TIAN Ping. A new united method of p - y curves of laterally statically loaded piles in clay[J]. **Journal of Hohai University**, 1991, 19(1): 9—17.
- [10] 章连洋, 陈竹昌. 计算黏性土 p - y 曲线的方法[J]. 海洋工程, 1992, 10(4): 50—58.
ZHANG Lian-yang, CHEN Zhu-chang. A new p - y curve construction method in cohesive soils[J]. **Journal of the Ocean Engineering**, 1992, 10(4): 50—58.
- [11] 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 Teng, WANG Tian-lin. Experimental research on silt p - y curves[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(5): 1343—1346.
- [12] 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 Yu-run, YUAN Xiao-ming, LIANG Yan. Modified calculation method of p - y curves for liquefied soil-pile interaction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(4): 595—599.
- [13] 黄茂松, 俞剑, 张陈蓉. 基于应变路径法的黏土中水平受荷桩 p - y 曲线[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 400—409.
HUANG Mao-song, YU Jian, ZHANG Chen-rong. p - y curve of lateral pile in clay based on strain path approach[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(3): 400—409.
- [14] BAGUELIN F, JEZEQUEL J F, LEMEE E, et al. Expansion of cylindrical probes in cohesive soils[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundations Division**, 1972, 98(11): 1129—1142.
- [15] VESIC A S. Expansion of cavities in infinite soil mass[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundations Division**, 1972, 98(3): 265—290.
- [16] 郑大同. 地基极限承载力的计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1979.
ZHENG Da-tong. Calculation of ultimate bearing capacity of soil[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1979.
- [17] 梅国雄, 宰金珉. 考虑变形的朗肯土压力模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 851—854.
MEI Guo-xiong, ZAI Jin-min. Rankine earth pressure model considering deformation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(6): 851—854.