

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.09.027

软土地基刚柔性桩水平承载位移控制标准研究

李洪江¹, 童立元¹, 刘松玉¹, 顾明芬², 陆湛秋³

(1. 东南大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210096; 2. 昆山市建设工程质量监督站, 江苏 昆山 2153001;
3. 江苏省建设工程设计施工图审核中心, 江苏 南京 210036)

摘 要: 在软土地区开展桩基工程建设, 桩基水平承载力的确定是一个亟待解决的问题。以 Matlock 软黏土 p - y 曲线为基础, 提出 Matlock p - y 曲线的双折线简化模型, 进而采用不排水抗剪强度指标 s_u 和静力触探锥尖阻力 q_c 对双折线简化模型参数 k_{mi} 、 p_u 进行表征。以无量纲桩土相对刚度系数 K_R 作为刚、柔性桩划分标准, 并分别建立了初始切线模量系数 K_E 与 K_R 、水平土抗力系数 K_C 与 K_R 的关系, 最后提出了软土地基刚、柔性桩水平承载位移控制标准。结果表明: 提出的位移控制标准可以快速确定桩基临界水平承载力, 是一种实用、可靠的桩基水平承载判别方法。

关 键 词: 软土地基; 刚性桩; 柔性桩; 位移控制标准; 水平承载; p - y 曲线

中图分类号: U 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)09-2676-08

Displacement standards for lateral capacity of rigid pile and flexible pile in soft soil foundation

LI Hong-jiang¹, TONG Li-yuan¹, LIU Song-yu¹, GU Ming-fen², LU Zhan-qi³

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China; 2. Construction Engineering Quality Supervision Station of Kunshan, Kunshan, Jiangsu 2153001, China; 3. Jiangsu Provincial Construction Drawing Examination & Verification Center, Nanjing, Jiangsu 210036, China)

Abstract: The determination of lateral force capacity of piles is a problem to be solved in construction of soft soil area. Based on the Matlock p - y curve used in soft clay, a simplified double broken line model of Matlock p - y curve was proposed, and then the undrained shear strength index s_u and CPT cone tip resistance q_c were used to represent the model parameter k_{mi} and p_u . The dimensionless relative stiffness coefficient of pile and soil, noted as K_R , was used as a classification standard to differentiate rigid pile and flexible pile. The relationships between the initial tangent modulus coefficient denoted K_E and the horizontal soil resistance coefficient denoted K_C were established. At last, the displacement standards for lateral capacity of rigid pile and flexible pile in soft soil foundation were developed. Results show that the displacement control standards can quickly determine the pile critical lateral capacity. It demonstrates a practical and reliable method of evaluating lateral capacity of pile foundation.

Keywords: soft soil foundation; rigid pile; flexible pile; displacement standard; lateral capacity; p - y curve

1 引 言

开展软土地基桩基工程建设, 桩基水平承载力的确定是一个难点。软土具有天然孔隙比大于等于 1.0, 天然含水率大于液限, 且强度低、压缩性高(压缩系数 $> 0.5 \text{ MPa}^{-1}$)、不排水抗剪强度通常小于 30 kPa 的特点^[1]。实践中发现, 软土地区很多工程未考虑桩的水平承载性能, 有些项目虽然有所考虑,

但也难以准确地给出水平承载力设计值。

目前, 国内规范对单桩水平承载力的确定, 首选的方法是单桩水平静载试桩试验, 但不同规范对试桩结果的判定标准却不尽相同, 表 1 总结了几类规范中单桩水平承载力特征值的取值方法。规范中虽然给出了不同桩型水平承载力特征值相应的确定方法, 但有关软土地基的单桩水平承载力确定标准及刚、柔性桩位移控制标准异同还未有明确的规定。

收稿日期: 2016-07-24

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的研究。E-mail: lihongjiang55@126.com

本文从 p - y 曲线的双折线简化模型出发，提出实用、可靠的软土地基刚、柔性桩水平承载位移控制标准，为今后软土地区桩基水平承载设计和理论研究提供参考。

表 1 规范法确定单桩水平承载力特征值
Table 1 Bearing capacity characteristic values of single pile by specification methods

规范号	规范名称	水平承载力特征值确定方法
JGJ 94-2008	建筑桩基技术规范 ^[2]	对于钢筋混凝土预制桩、钢桩、桩身配筋率不小于 0.65% 的灌注桩，取地面水平位移 10 mm（敏感建筑物取 6 mm）所对应荷载的 75%；对于配筋率小于 0.65% 的灌注桩，取单桩水平静载试验临界荷载的 75%。
GB 50007-2011	建筑地基基础设计规范 ^[3]	桩身不允许开裂时，取水平试桩临界荷载的 0.75 倍；桩身允许开裂时，取水平试桩极限荷载除以安全系数 2。
JGJ106-2014	建筑基桩检测技术规范 ^[4]	当按桩身强度控制时，直接取为水平试桩临界荷载；当受长期水平荷载作用且桩身不允许开裂时，取水平试桩临界荷载的 0.8 倍。
DGJ32/J 12-2005	南京地区建筑地基基础设计规范 ^[5]	取地面水平位移为 10 mm 时（敏感建筑物取 6 mm）对应水平荷载值。
DGJ08-11-2010	上海地基基础设计规范 ^[6]	均规定取水平位移为 10 mm 时所对应水平荷载乘以 0.75。

2 分析思路

2.1 桩基水平承载机制

桩基水平承载问题是一个复杂的桩-土相互作用问题。桩基在发生水平变位过程中，伴随桩身挠度的增加，桩侧土抗力也相应增加，图 1 为刚性桩、柔性桩水平承载机制示意图。桩侧地基土在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，对于配筋率较低的桩体还会出现桩身开裂或折断。桩的埋置深度不同，桩身与土体的相对刚度不同，桩在水平荷载作

用下的工作性状也不相同。对于桩体相对刚度较大的单桩，在水平荷载作用下表现为刚体转动，这类桩称为刚性桩，其水平承载力一般由桩侧土的强度控制。对于桩体相对刚度较小的单桩，其柔性很大，犹如竖置于地基中的弹性梁，称为柔性桩，柔性桩的水平承载力由桩身材料的抗弯强度和桩侧土抗力共同控制。

桩基水平承载力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。目前，国际上研究桩基水平承载力的主流方法为 p - y 曲线法^[7]， p - y 曲线能综合反映桩-土相互作用的复杂性和非线性，并且不受桩身变位大小的影响。

2.2 软黏土 p - y 曲线的双折线简化

对于桩基 p - y 曲线的研究，国内外学者开展过很多工作，从静力、动力角度提出了诸多 p - y 模型^[8]，模型涵盖了黏性土、无黏性土的范畴。但最经典、被各类规范认定的仍属 Reese 的砂性土双曲线 p - y 模型和 Matlock 的黏性土 p - y 模型。Bouafia^[9]曾采用双折线简化形式对双曲线 p - y 模型进行描述（见图 2），给出了简化模型中初始切线模量 k_{ini} 、水平

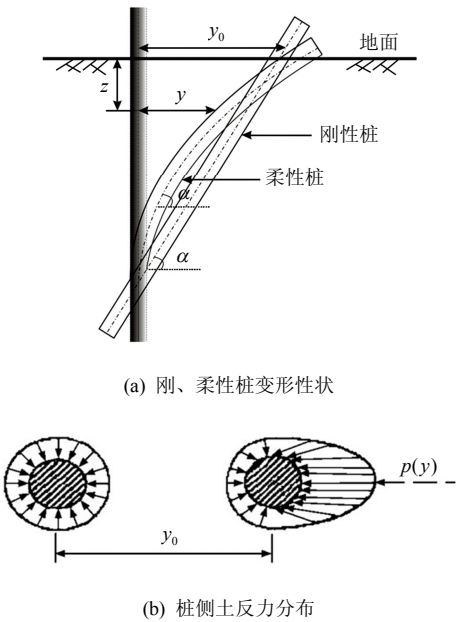


图 1 桩基水平承载机制示意
Fig.1 Horizontal bearing mechanism of a single pile

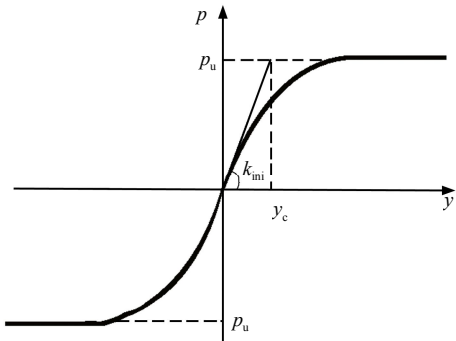


图 2 Bouafia 双折线简化示意
Fig.2 Double broken line model of Bouafia

极限土抗力 p_u 两个重要参数的表达, 并定义两条直线的交点位移 y_c 为桩基水平承载的临界位移点。上述简化形式在工程实践中证明是合理的并得到了广泛应用。

Matlock 黏性土 $p-y$ 模型^[10]与双曲线模型虽然函数表达有所不同, 但二者的曲线特征存在相似性。Kim^[11]曾指出, 双曲线模型也能描述黏性土地基的桩侧土 $p-y$ 曲线关系。基于此, 对 Matlock 的黏性土 $p-y$ 模型进行双折线简化表达, 确定 $p-y$ 曲线的加速(临界)拐点 y_c , 用于描述软土地基的单桩水平承载位移控制标准。Matlock 的 $p-y$ 曲线被美国石油协会(API)^[12]列为软黏土(不排水抗剪强度小于 96 kPa)桩基水平承载设计的规范算法, 也被我国现行《港口工程桩基规范》^[13]采用。其曲线形式见图 3。

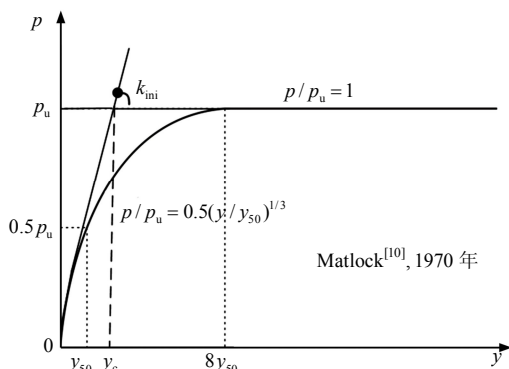


图 3 软黏土 $p-y$ 曲线及其双折线简化
Fig.3 $p-y$ curve of soft clay and its double broken line model

$p-y$ 曲线公式按下式确定:

$$\frac{p}{p_u} = \begin{cases} 0.5\left(\frac{y}{y_{50}}\right)^{\frac{1}{3}}, & y/y_{50} < 8 \\ 1, & y/y_{50} \geq 8 \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} p_u &= \left(3 + \frac{\gamma' z}{s_u} + \frac{0.5z}{D}\right) s_u D, & z < z_r \\ p_u &= 9s_u D, & z \geq z_r \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$y_{50} = 2.5\varepsilon_{50}D \quad (3)$$

式中: p_u 为水平极限土抗力; y_{50} 为桩周土达到极限抗力 1/2 时的桩挠曲变形; s_u 为土体不排水抗剪强度; γ' 为土体的有效重度; D 为桩的计算宽度(cm); z 为桩的埋置深度; z_r 为临界深度, 按下式给定:

$$z_r = \frac{6D}{\gamma' \frac{D}{s_u} + 0.5} \quad (4)$$

对 Matlock 软黏土 $p-y$ 曲线进行双折线简化, 处理方法和参数意义同 Bouafia 的双曲线型 $p-y$ 双折线简化模型, k_{ini} 为 Matlock $p-y$ 曲线初始切线模量, p_u 为 Matlock $p-y$ 曲线水平极限土抗力。

2.3 刚、柔性桩的界定

刚性桩、柔性桩的水平承载控制机制是有区别的, 表现在是按桩身强度控制还是按桩侧土抗力控制, 二者的本质区别又体现在桩的相对刚度上。桩的相对刚度直接反映桩-土刚性特征之间的关系, 又间接反映桩侧土抗力模量 k 随深度变化的性质。《港口工程桩基规范》^[13]采用线性 m 法定义桩的相对刚度系数为

$$T = \sqrt[5]{\frac{EI}{mD}} \quad (5)$$

式中: E 、 I 分别为桩的弹性模量 (N/cm^2) 和截面惯性矩 (cm^4); m 为桩侧土反力系数的比例系数 (N/cm^4), 表征桩侧土反力系数 k 随深度的线性变化关系; T 为相对刚度系数 (cm)。

桩的相对刚度系数是一个考察桩基水平承载能力的重要指标, 它涵盖了桩身按强度控制(桩身是否允许开裂), 也涵盖了按变形控制的原则。避免了计算冗杂的水平承载力与桩长、混凝土强度、配筋率等单一参数的对应关系。表 2 是《港口工程桩基规范》^[13]给出的刚、柔性桩划分标准 (L 为桩埋置深度), 我国交通部门也规定, 桩基自地面或冲刷线算起的实际埋置深度小于 $2.5T$ 时为刚性桩, 大于等于 $2.5T$ 时为弹性桩(柔性桩)^[14]。

表 2 刚性桩、柔性桩划分标准

Table 2 Definition standard of rigid pile and flexible pile

方法	柔性桩		刚性桩(短桩)
	柔性长桩	柔性桩(中长桩)	
m 法计算	$L \geq 4T$	$4T > L \geq 2.5T$	$L < 2.5T$

3 $p-y$ 参数的描述

3.1 不排水抗剪强度 s_u 表征

不排水抗剪强度是软土强度特性和地基基础稳定性的重要评价指标。Matlock 软黏土 $p-y$ 曲线包含两个核心参数: 水平极限土抗力 p_u 和桩周土达到极限抗力 1/2 时的桩挠曲变形 y_{50} 。由式 (2)、(3) 可知, p_u 是 s_u 的函数, y_{50} 与三轴压缩试验中最大偏应力的 50% 所对应的应变值 ε_{50} 相关。

Ebrahimian 等^[15]最新研究指出(基于 495 组现场试验数据), 表征软黏土桩-土相互作用的指标 ε_{50} 也可由土体的不排水抗剪强度 s_u 表征, 并建立了基

于单一变量 s_u 和双变量超固结比 OCR 、 s_u 为指标的 ε_{50} 表达方程式，分别为

$$\varepsilon_{50} = 16.3s_u - 0.7 \quad (6)$$

$$\varepsilon_{50} = 5s_u OCR - s_u - 0.01OCR - 0.5 \quad (7)$$

至此式 (1) 中 p_u 和 y_{50} 均可通过 s_u 进行表征，Matlock 软黏土 p - y 曲线仅是土体不排水抗剪强度 s_u 与桩体参数的函数。因此，对于图 3 Matlock p - y 双折线简化模型，任意深度 p - y 可以写成式以下表达形式：

$$f(s_u, EI, L, D, p_u, k_{ini}) = 0 \quad (8)$$

对式 (8) 进行无量纲化处理得

$$g\left(\frac{k_{ini}}{s_u}, \frac{p_u}{s_u D}, \frac{L}{D}, \frac{EI}{s_u L^4}\right) = 0 \quad (9)$$

式 (9) 中第 1 个比例系数是 s_u 表征下的切线模量大小系数，记作 λ ：

$$k_{ini}(z) = \lambda \cdot s_u(z) \quad (10)$$

第 2 个比例系数是 s_u 表征下的水平土抗力大小系数，记作 η ：

$$p_u(z) = \eta \cdot s_u(z) \cdot D \quad (11)$$

桩基 p - y 曲线研究中的挠曲微分方程为

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + p(z, y) = 0 \quad (12)$$

对于以 m 法表征 p - y 曲线特征，其桩侧土抗力方程为

$$p(z, y) = k(z)y = mDzy \quad (13)$$

式中：水平土抗力系数 $k(z)$ 记为 $k(z)=mDz$ ，对于图 3， $k(z)$ 同时为任意深度 p - y 曲线的切线模量。

考虑土体沿桩长分布的成层性和非线性，给出当量值 $\{k\}$ 表征桩侧土水平土抗力系数随深度变化的平均值：

$$\{k\} = \frac{1}{L_e} \int_0^{L_e} k(z) dz = \frac{1}{L_e} \int_0^{L_e} mDz dz = \frac{1}{2} mDL_e \quad (14)$$

式中： L_e 为桩体的有效埋置深度， L_e 以下的桩体不发生挠曲变形， m 按规范取值^[2]。按照表 2， L_e 计算公式为

$$L_e = \min\{L, 2.5T\} \quad (15)$$

桩的相对刚度系数 T 由于自身是一个包含量纲 (cm) 的物理量，对评价式 (9) 各参数的相对关系不太方便，因此，须定义一个无量纲的相对刚度系数，且能保证与表 2 的刚、柔性桩划分标准一致。经过量纲一化，本文给出无量纲桩土相对刚度系数 K_T 为

$$K_T(k) = \frac{EI}{\{k\} \cdot L^4} \quad (16)$$

当 $L=L_e$ 时，将式 (5)、(14) 代入式 (16) 得

$$K_T(k) = \frac{2EI}{mDL_e^5} = 2\left(\frac{T}{L_e}\right)^5 \quad (17)$$

对于表 2 中刚性桩、柔性桩的分界点 $L=2.5T$ ，当 $L=L_e$ 时， $K_T=0.0205$ 可作为后续的刚、柔性桩划分标准，其划分标准与表 2 规范法相一致。

3.2 CPT/CPTU 锥尖阻力 q_c 表征

软土不排水抗剪强度的确定方法有 Bjerrum 法、Mesri 法，USALS 法、SHANSEP 法、有效固结应力法、Tsuchida 法等^[16]。相较静力触探 CPT/CPTU 技术，不排水抗剪强度在理论确定上仍存在限制，常用十字板剪切试验又受硬夹层的限制，测试深度也难保证。

Lunne 等^[17]指出，CPT 测试锥尖阻力 q_c 与土体不排水抗剪强度 s_u 有很好的对应性和一致性，李洪江等^[18]基于 q_c 与 s_u 的对应关系建立了孔压静力触探 CPTU 测试 p - y 曲线模型。 q_c 与 s_u 的经典计算表达式为

$$s_u = \frac{q_c^*}{N_k} = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_k} \quad (18)$$

式中： q_c^* 为净锥尖阻力； N_k 为锥尖系数； σ_{v0} 为总上覆土压力； q_t 为经过如下孔压修正公式得到的锥尖阻力，其表达式为

$$q_t = q_c + u_2(1-a) \quad (19)$$

式中： q_c 为实测锥尖阻力； u_2 为在锥肩位置量测的孔压； a 为探头有效面积比， $a=0.8$ 。

基于此，可以直接将由不排水抗剪强度 s_u 表征的 p - y 参数过渡到由 CPT/CPTU 锥尖阻力 q_c 进行表征，实现更便捷，利于工程实践的 p - y 曲线参数获取。Ebrahimian 等^[15]在研究过程中指出，式 (6)、

(7) 中 ε_{50} 对土体的扰动非常敏感，而静力触探是近似非扰动原位试验，用锥尖阻力替代不排水抗剪强度进行 p - y 参数表征也克服了土体扰动的问题。

依据式 (18)，用 q_c^* 重新对式 (10)、(11) 进

行定义:

$$k_{\text{ini}} = K_E q_c^* \quad (20)$$

$$p_u = K_C q_c^* D \quad (21)$$

式中: K_E 为 q_c^* 表征下的切线模量系数; K_C 为 q_c^* 表征下的水平土抗力系数。

沿深度变化的净锥尖阻力 q_c^* 的当量值 $\{q_c^*\}$ 为

$$\{q_c^*\} = \frac{1}{L_c} \int_0^{L_c} q_c^*(z) dz = \frac{1}{L_c} \sum_{i=1}^n q_c^*(i) h_i \quad (22)$$

式中: h_i 为将土体离散为 n 个薄层单元后的第 i 单元土层厚度; $q_c^*(i)$ 为第 i 层土的平均净锥尖阻力, 且有

$$q_c^*(i) = \frac{1}{h_i} \int_0^{h_i} q_c^*(z) dz \quad (23)$$

用 CPT/CPTU 锥尖阻力表征的无量纲桩土相对刚度系数记为

$$K_R = \frac{EI}{\{q_c^*\} L^4} \quad (24)$$

此处 K_R 与式 (16) K_T 等效, 依旧在 $L=L_c$ 时, 取 $K_R=0.0205$ 作为刚、柔性桩划分标准, 与规范规定^[12]保持一致。

4 刚、柔性桩位移控制标准

Bouafia^[9,19]指出, 对于桩头自由、长细比 $L/D \geq 10$ 的水平受荷桩, 其切线模量系数 K_E 、水平土抗力系数 K_C 是无量纲桩土相对刚度系数 K_R 的幂函数, 且满足下式:

$$K_E = \begin{cases} \frac{1}{10} K_R^{-1.1}, & K_R > 2.1 \times 10^{-2} \\ 7.0, & K_R \leq 2.1 \times 10^{-2} \end{cases} \quad (25)$$

$$K_C = \begin{cases} 1.4 K_R^{0.083}, & K_R > 2.1 \times 10^{-2} \\ 0.06, & K_R \leq 2.1 \times 10^{-2} \end{cases} \quad (26)$$

这里 Bouafia 给出的分段函数分界点 $K_R = 2.1 \times 10^{-2}$ 恰同式 (16)、(24) 定义的刚性桩、柔性桩划分标准相一致 ($K_R = K_T = 0.0205$), 也即桩有效埋置深度与桩相对刚度系数的比值 $L_c/T=2.5$, 符合我国规范^[13]定义。图 4、5 示出了按刚、柔性桩划分标准作出的 K_E-K_R 、 K_C-K_R 关系, 图中柔性桩的 K_E 值、 K_C 值是明显的定值, 而刚性桩的 K_E 、 K_C 则随无量纲桩土相对系数 K_R 变动。

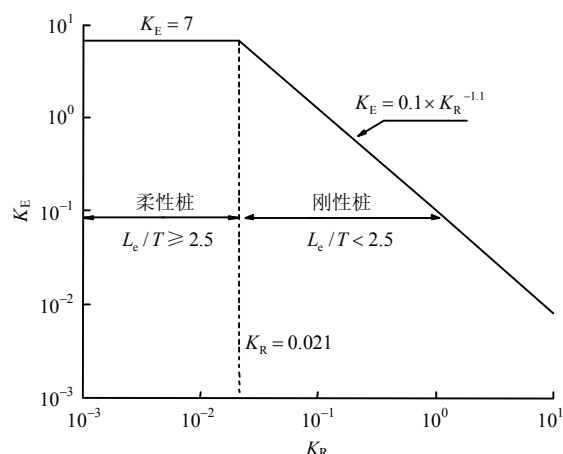


图 4 K_E-K_R 关系

Fig.4 Relationship between K_E and K_R

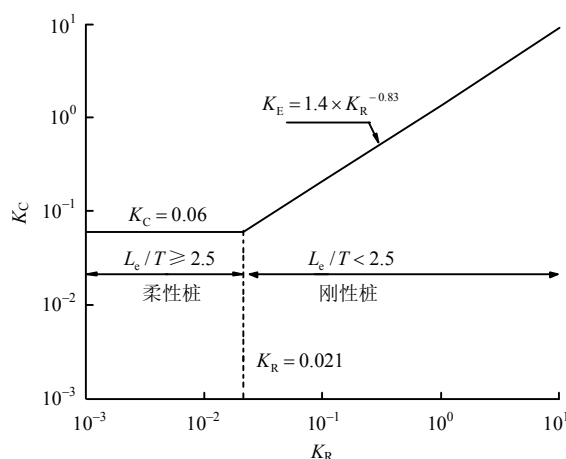


图 5 K_C-K_R 关系

Fig.5 Relationship between K_C and K_R

对于图 3 定义的 Matlock 软黏土 $p-y$ 曲线双折线模型, y_c 为桩基水平承载的临界位移点, y_c 由初始切线模量 k_{ini} 渐近线与极限水平土抗力 p_u 渐近线共同确定。根据式 (20)、(21), 有

$$y_c = \frac{p_u}{k_{\text{ini}}} = \frac{K_C q_c^* D}{K_E q_c^*} = \frac{K_C}{K_E} D \quad (27)$$

对于柔性桩, 即 $K_R \leq 2.1 \times 10^{-2}$ 的情况, y_c 相对位移量为

$$\frac{y_c}{D} = \frac{K_C}{K_E} \approx 0.86\% \quad (28)$$

对于刚性桩, 即 $K_R > 2.1 \times 10^{-2}$ 的情况, y_c 相对位移量为

$$\frac{y_c}{D} = \frac{K_C}{K_E} = 14 K_R^{1.93} \approx 14 K_R^2 \quad (29)$$

因此, 软土地区柔性桩的水平承载位移控制标

准可直接取为桩径的 0.86%，此时的桩顶荷载对应单桩的临界水平荷载；刚性桩的水平承载位移控制标准由无量纲桩土相对刚度系数 K_R 的二次方进行确定。需要指出的是，软土地基由于土层软弱，强度较低，工程实际中的设计桩长都较长，桩型大多以柔性长桩为主，因此，桩基水平承载位移控制标准 $y_c/D=0.86\%$ 对指导软土地区桩基工程实践具有重要意义。

5 工程验证分析

结合江苏软土地区 3 个场地 12 根单桩水平静力荷载试验，考察刚、柔性桩在水平荷载作用下的工作性状，根据试桩实测数据，验证本文桩基水平承载位移控制标准的正确性和可行性。

5.1 实例工程概况

(1) 实例 1

靖江文化中心建设项目位于靖江市地貌上，属长江三角洲冲积平原，场地广泛分布深厚粉质黏土层和淤泥质粉质黏土层。该项目主体结构复杂，分为高层部分（办公区、博物馆、文化办公楼）、公共文化区、商业区及剧院等，地下为 1 层大底盘地下室。其中剧场结构中的 4 个巨型核心筒下采用桩长为 68 m，桩径为 1 000 mm 的超长钻孔灌注桩，混凝土强度等级为 C30，桩身配置 16 根 $\phi 25$ mm 主筋。按照设计要求，需完成 5 根桩的水平试桩检测。

(2) 实例 2

京沪高速铁路昆山南站站房工程项目位于京沪高铁线昆山市，总建筑面积约 21 470 m²。场地地基土除浅部素填土外，均为滨海—河口、湖沼相第四系沉积土层。粉质黏土层，呈灰黄色，软塑~可塑，含少量腐植物及铁质锈斑，中等压缩性；淤泥质粉质黏土层呈灰色、流塑、饱和，含少量有机质，夹粉土薄层，薄层厚 1~3 mm 之间，高压缩性。选用钻孔灌注桩，桩长为 45 m，桩径为 800 mm，混凝土等级为 C35，场地共完成 3 根桩的水平静力荷载试验。

(3) 实例 3

江苏华电昆山天然气能源工程位于昆山市经济技术开发区内，厂址分为南北两块，总占地面积为 169 669.8 m²。地貌单元属典型的冲积—湖积平原，场地埋深 70 m 以上主要为第四系全新统人工堆积物及冲、湖积物，冲积物及上更新统海、陆交互相沉积物，以淤泥质土、黏性土、砂性土为主。试桩 T1~T3 采用预应力混凝土管桩，即 PHC 500 AB 100-25b 桩，桩长为 21.0 m。试桩数量为 3 根。试

桩 T4 采用 PHC 600 AB 110-46b 桩，桩长为 46.0 m，试桩数量为 1 根。

5.2 实例验证

3 个场地均采用千斤顶单向多循环加载，试桩桩顶自由，试验加载过程严格按照《建筑基桩检测技术规范》^[4]规定进行。按照规范原则，试桩结果取桩顶位移梯度($\Delta Y_0/\Delta H$)—水平力 H 关系图中第一直线段终点所对应的荷载为单桩临界水平荷载。图 6 为实例 1 靖江软土地试桩典型($\Delta Y_0/\Delta H$)— H 关系图，其他场地处理方式同图 6。

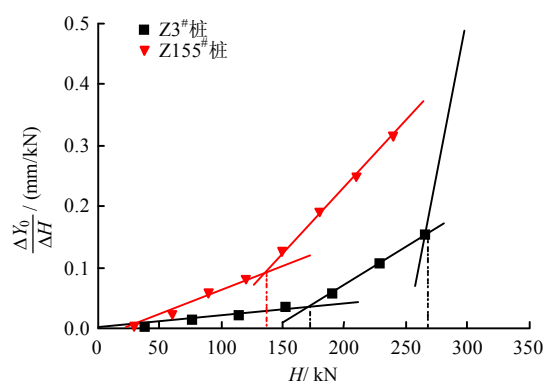


图 6 桩顶位移梯度—水平力关系

Fig.6 Relationships between $\Delta Y_0/\Delta H$ and H

场地静力触探参数由勘察报告提供，为确保计算精度，静力触探孔位的选择不宜与试桩位置距离太远。刚性桩 K_R 值由式 (24) 计算给出，并代入式 (29) 进行单桩水平临界荷载控制位移的预测求解；柔性桩的水平临界荷载控制位移直接由式 (28) 进行确定。以下汇总 3 个场地 12 根桩的试桩结果，对由规范法确定和由本文法预测的临界水平荷载值进行比较，详见表 3。

由表 3 可知，本文方法预测结果与规范法确定的单桩临界水平荷载值具有较好的一致性，除靖江文化中心试桩 Z71#和 Z155#误差较大外（分别达到 25%和 49.6%），其余试桩对比误差都控制在 5%左右。Z71#和 Z155#桩误差过大，分析原因为，Z71#和 Z155#这 2 根桩在试桩过程中正遇雨天，试桩和反力桩之间出现大片积水，致使加载过程中桩侧土体水平位移变大，使同等位移下所对应的桩顶水平力偏低，造成了本文预测结果与实测结果的误差。但综合表 3 可知，本文法预测与规范法结果吻合较好，确保了本文方法的可行性，且本文方法无需后期的冗杂数据处理（见图 6），其可以由位移控制标准 y_c/D 直接现场确定桩基临界水平承载力，进而给出桩基承载力设计值。

表 3 本文法预测结果与规范法结果对比

Table 3 Comparison between predictions by the proposed procedure and results by specification methods

试验 场地	桩型	编号	分类	桩径	临界水平荷载/kN		误差
				/ mm	规范	预测	/ %
靖江 文化	灌注桩	Z3 [#]	柔性桩	1 000	172	180	4.65
		Z4 [#]		1 000	210	195	7.14
		Z6 [#]		1 000	165	171	3.64
		Z71 [#]		1 000	172	215	25
		Z155 [#]		1 000	135	202	49.6
昆山 站房	灌注桩	CT4-4-3 [#]	柔性桩	800	350	333	4.86
		CT4-10-4 [#]		800	369	350	5.15
		CT4-15-4 [#]		800	352	350	0.57
昆山 燃气	PHC500	T1	刚性桩	500	50	52	4.00
	AB100-25	T2		500	60	64	6.67
	b	T3		500	70	72	2.86
	PHC600AB 110-46b	T4		柔性桩	600	75	77

6 结 论

(1) 结合软土地基桩基水平承载特点, 提出了 Matlock 软黏土 p - y 曲线的双折线简化模型, 确定 y_c 为软土地基桩基水平承载的加速 (临界) 位移点。

(2) 分别采用不排水抗剪强度 s_u 和静力触探锥尖参数 q_c 对双折线 p - y 模型的初始切线模量 k_{ini} 、水平极限土抗力 p_u 进行表征, 建立了参数 k_{ini} 、 p_u 与无量纲桩土相对刚度系数 K_R 的相关关系。指出无量纲桩土刚度系数 $K_R=0.020\ 5$ 可作为刚、柔性桩的划分标准, 这一标准与已有规范保持一致。

(3) 提出了软土地区刚、柔性桩水平承载位移控制标准: 柔性桩的水平承载位移标准为桩径的 0.86%, 刚性桩的水平承载位移标准由无量纲桩土相对刚度系数 K_R 的二次方确定, 并通过工程实例进行了验证, 这一标准较已有规范法更能快速确定桩基临界水平承载力, 进而给出桩基水平承载力设计值。

参 考 文 献

- [1] 缪林昌. 软土力学特性与工程实践[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
MIAO Lin-chang. Technical characteristics of soft soil and its application in project project[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 94-2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. JGJ 94-2008 Technical code for building pile foundations[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2008.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50007-2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. GB 50007-2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2011.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ106-2014 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. JGJ106-2014 Technical code for testing of building foundation piles[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2014.
- [5] 南京市建设委员会. DGJ32/J 12-2005 南京地区建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
Nanjing Municipal Construction Committee. DGJ32/J 12-2005 Code for design of building foundation in Nanjing area[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2005.
- [6] 上海市城乡建设和交通委员会. DGJ08-11-2010 上海地基基础设计规范[S]. 上海: 上海市建筑建材业市场管理总站出版社, 2010.
Shanghai Urban and Rural Construction and Traffic Committee. DGJ08-11-2010 Shanghai foundation design code[S]. Shanghai: Shanghai Station of the Building Materials Industry Market Management Press, 2010.
- [7] ZHU B, CHEN R, GUO J, et al. Large-scale modeling and theoretical investigation of lateral collisions on elevated piles[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2011, 138(4): 461-471.
- [8] ASHOUR M, NORRIS G. Modeling lateral soil-pile response based on soil-pile interaction[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2000, 126(5): 420-428.
- [9] BOUAFIA A. p - y curves for single piles in fine soils from the prebored pressuremeter — a new approach[C]// Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation and Highway Engineering. Semarang: [s. n.], 2011: 567-572.
- [10] MATLOCK H. Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay[C]//Proceedings of the 2nd Offshore Technical Conference. Houston: Offshore Technology in Civil Engineering's Hall, 1970: 77-94.
- [11] 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.