

m 法计算单桩水平承载力在上海地区的适用性分析

刘陕南^{1, 2}, 侯胜男^{1, 2}, 蔡忠祥^{1, 2}

(1. 上海现代建筑设计(集团)有限公司, 上海 200041; 2. 上海既有建筑功能提升工程技术研究中心, 上海 200041)

摘 要: 针对《建筑桩基技术规范》推荐的 m 法, 通过上海地区大量单桩水平试桩资料验证了 m 法在上海软土地区的适用性, 通过试验资料对 m 值进行了反算, 并与上海《地基基础设计规范》以及《港口工程桩基规范》推荐的 m 值进行比较; 分别选择灌注桩和 PHC 管桩不同桩型的试桩资料, 通过 m 法与实测弯矩以及其他计算方法比较, 结果表明采用 m 法计算确定单桩水平承载力对上海软土地区建筑桩基是适用的, 计算桩身弯矩曲线与实测曲线比较吻合, m 值建议可按上海《地基基础设计规范》中规定范围的上限取用。

关键词: 单桩水平载荷试验; 单桩水平承载力计算; m 法

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)S2-0721-04

作者简介: 刘陕南(1973-), 女, 湖北石首人, 工学硕士, 高级工程师, 国家注册土木工程师(岩土), 长期从事地基基础与地下工程设计与科研。E-mail: shannan_liu@xd-ad.com.cn。

Applicability of m -method for horizontal bearing capacity of single pile in Shanghai area

LIU Shan-nan^{1, 2}, HOU Sheng-nan^{1, 2}, CAI Zhong-xiang^{1, 2}

(1. Shanghai Xian Dai Architectural Design(Group)Co., Ltd., Shanghai 200041, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Existing Building Function Enhancement, Shanghai 200041, China)

Abstract: As for the m -method recommended by China's technical code for building pile foundation, the applicability of the method in Shanghai soft soil area is validated by means of test data of single pile. The m value is back-calculated based on the test data, and it is compared with that suggested by Shanghai's foundation design code and China's code for port foundation of harbour engineering. The data of cast-in-place piles and PHC piles are selected to compare the values by m -method with the measured bending moments as well as the results of other methods. The results show that the m -method is applicable to determine the horizontal bearing capacity of single pile in Shanghai soft soil area. The curve of the calculated bending moment agrees with the measured one. The m -value is recommended according to upper limit stipulated by the Shanghai's foundation design code.

Key words: lateral load test on single pile; lateral bearing capacity of single pile; m -method

0 引 言

单桩水平承载力计算是高度非线性问题, 目前单桩水平承载力计算方法主要有理论计算和数值计算方法。理论计算方法采用浅层土体极限抗力的分布模式, 计算方法主要有极限地基反力法、弹性地基反力法以及 $p-y$ 曲线法和 NL 计算方法, 上海地区桩基以弹性长桩为主, 极限地基反力法主要针对刚性短桩, 对上海地区并不适用; 弹性地基反力方法, 根据地基的基床系数假定不同, 提出了众多方法, 如 C 法、 k 法、 m 法等。另外针对桩身结构和土体塑性开展精细模拟, 涌现出众多数值方法^[1]。

在实际工程设计中, 理论简化方法运用较为广泛, 《建筑桩基技术规范》JGJ94—2008 中推荐采用基于

弹性地基反力的 m 法估算单桩水平承载力。该规范在 1994 版修订时结合 1979~1980 年在黄河洛口^[2]的中压粘性黏土和粉砂土中进行的一批桩基载荷试验, 给出了单桩水平承载力基于 m 法的实用估算公式。采用《建筑桩基技术规范》推荐的 m 法计算单桩水平承载力时, 土层 m 值的取值对承载力的影响较大, 该公式在上海地区软土地区常用的不同桩型的适用性也有待深入分析。

因此, 本文基于上海地区一系列单桩水平载荷试验, 对建筑工程中常用的 m 法在上海地区的适用性及其参数取值进行详细分析探讨。

1 单桩水平载荷试验情况简介

单桩水平载荷试验是确定单桩水平承载力最基本、可靠的方法，为此本文收集上海地区 12 个场地 57 根水平载荷试验资料^[3-4]，涵盖灌注桩、预应力管桩、预应力空心方桩和预制方桩。试桩加载力点主要在②层黏土中进行，部分试桩力点在基坑开挖面④层淤泥质黏土中。桩型以灌注桩数目较多，桩径覆盖常用 $\phi 550\sim 800\text{ mm}$ ，PHC 管桩为设计中常用 $\phi 400\sim 500\text{ mm}$ 。

2 规范推荐的 m 法适用性分析

2.1 m 值确定

采用 m 法计算单桩水平承载力时，地基土水平抗力系数的比例系数 m 值确定对桩身承载力影响较大。当缺乏现场试验资料时，可根据场地情况参照规范推荐的 m 值经验参数取值。当有单桩水平承载力载荷试验资料时，按 m 法原理推导，桩顶自由且水平力作用点位置在泥面处时，地基土的 m 值可按式计算：

$$m=\frac{\left(V_y\cdot H\right)^{\frac{5}{3}}}{b_0Y_0^3\left(EI\right)^{\frac{2}{3}}}。$$
 (1)

应该指出， m 值对于同一场地并非定值，低荷载水平下， m 值较高；随荷载增加，桩侧土的塑性区逐渐扩展而降低。因此 m 值应与实际荷载、允许位移相适应。

根据桩顶位移 10 mm 时的水平荷载反算 m 值，并与上海《地基基础设计规范》DGJ 08—11—2010 和《港口工程桩基规范》JTJ 254—98 修订版推荐取值对比如表 1 所示。规范取值分别按照算术平均以及厚度加权平均计算。表中试验反算的场地 m 值总体比较离散，比上海地基规范所提供的工程经验值大，更接近

港口桩基规范经验参数表格的取值。因此按上海地基规范经验参数表格取值总体上是偏安全的。

2.2 m 法计算承载力

上海地基规范采用 m 法计算单桩水平承载力。当桩的水平承载力由桩顶水平位移控制，且缺少单桩水平静载荷试验资料时，对于预制桩、钢桩、桩身配筋率不小于 0.65% 的灌注桩，可按式（2）估算单桩水平承载力：

$$R_{ha}=0.75\frac{\alpha^3EI}{v_x}\chi_{0a}，$$
 (2)

式中， v_x 为桩顶水平位移系数，宜按桩顶铰接取值，为 2.441， α 为桩的水平变形系数， $\alpha=\sqrt[5]{mb_0/EI}x_{0a}$ 为桩顶允许水平位移，一般可取 10 mm，对水平位移敏感的建筑取 6 mm。

单桩水平承载力按上式计算， m 值根据上海地区对浅层黏性土、粉土的经验参数，分别取下限（2 MN/m⁴）和上限（4 MN/m⁴）。并与试验确定的承载力水平承载力进行比较，如图 1 所示。

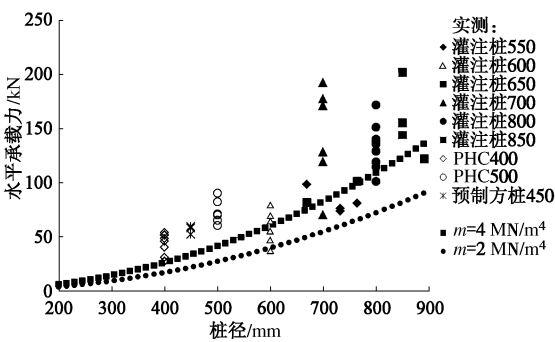


图 1 试验水平承载力与 m 法计算水平承载力的比较

Fig. 1 Comparison of horizontal bearing capacities between m -method and test

比较实测值与公式计算曲线可知，公式计算值比试验值稍低，采用 m 值取 2 MN/m⁴ 进行计算的计算值能完全包络试验值，是较为保守的；采用 m 值取 4

表 1 试验反算 m 值与不同规范经验参数比较

Table 1 Comparison among m values by back analysis and codes (MN/m⁴)

工程名称	桩型	试验土层	试验反算 m 值	上海地基规范		港口工程桩基规范	
				算术平均	土层厚度加权平均	算术平均	层厚度加权平均
T1-CF	灌注桩	② ₁ 粉质黏土	3.6	1.5~3	0.9~1.8	5.25~8	3~5
S1-LG	灌注桩	杂填土	8.0	3~5	3~5	3.5~5.5	3.5~5.5
S2-GB	灌注桩	②黏土	5.0	3~5	1~2	3.5~5.5	2.75~3.25
S3-CS	灌注桩	③ ₁ 粉质黏土	5.0	1~2	0.5~1.0	1~2.25	0.5~1.0
S4-HQ	灌注桩	④淤泥质黏土	12.0	0.5~1.0	0.5~1.0	1~2.25	1~2.25
S5-JS	灌注桩	②粉质黏土	10.0	1.5~3	1.5~3	4.5~6	4.5~6
T2-SL	PHC	②粉质黏土	3.8	1.5~3	1.2~2.4	4.5~6	4~5
S5-JS	PHC	②粉质黏土	3.4	1.5~3	1.5~3	4.5~6	4.5~6
T3-DW	PHC	②粉质黏土	10.0	1.5~3	1.5~3	4.5~6	4.5~6
S6-DB	PHC	② ₁ 黏土	7.6	3~5	3~5	4.5~6	4.5~6

MN/m⁴ 进行计算的计算值基本上是每个场地试验值的下限, 个别场地试验值在计算值附近, 稍低一些, 保证率达到 86.3%。因此上海地区浅层水平承载力计算 *m* 值取值可按规范推荐的经验参数上限进行估算。

2.3 *m* 法计算弯矩

在确定场地合适的 *m* 值之后, 可以根据 *m* 法按式 (3) 计算地面下不同深度处桩身弯矩, 并可将实测桩身弯矩与在该荷载水平下的计算弯矩进行对比:

$$M = \alpha^2 EI \left(y_0 A_3 + \frac{\varphi_0}{\alpha} B_3 + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C_3 + \frac{H_0}{\alpha^3 EI} D_3 \right), \quad (3)$$

式中, *A*₃, *B*₃, *C*₃, *D*₃ 为沿深度的影响函数, 可查《建筑桩基技术规范》JGJ94—2008 附表。

T3-DW 工程在桩身贴光纤传感器得到了桩身在开裂前的实测桩身弯矩, 水平荷载 72.5 kN, 对应试验点水平位移 10 mm, 在此级荷载下, 实测桩身弯矩和采用 *m* 法计算的桩身弯矩比较如下图 2 所示。实测弯矩和计算弯矩的最大弯矩点位置基本是重合的, 上采用 *m* 法计算的弯矩数值稍低为 70 kN·m, 实测数值为 77 kN·m。

根据场地土层情况, 按照规范建议的经验参数值为 1.5~3 MN/m⁴, 取上下限进行桩身弯矩估算, 可以看出按经验参数进行计算的桩身弯矩, 其最大弯矩值比实测值要大, 且最大弯矩点的位置比实测最大弯矩点位置要低 1.0 m 左右。

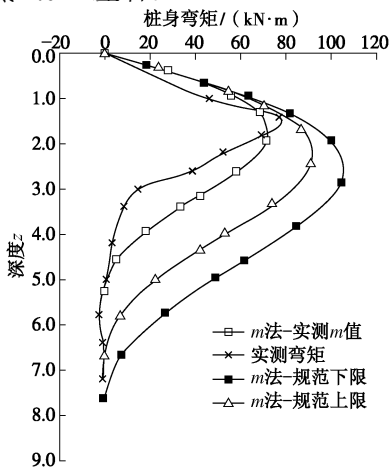


图 2 桩身弯矩 *m* 法与实测比较

Fig. 2 Comparison of bending moments between *m*-method and in-situ tests

因此, *m* 值根据试验成果确定是最为合理的, 在此基础上采用 *m* 法能较为准确地估算桩身弯矩, 为设计提供依据。

3 *m* 法与其他方法比较

常用的计算分析方法中除了 *m* 法还有张氏法、*C* 法、*p*-*y* 法、NL 法等。下面通过 2 个场地不同桩型

的试验资料, 对几种估算方法进行比较, 通过载荷试验资料反算计算参数, 比较桩身最大弯矩的大小、位置和弯矩曲线等, 分析不同方法的区别及 *m* 法的适用性。

3.1 灌注桩

以 S2-GB 场地 Φ 850 mm 的灌注桩为例, 根据现场试验在桩顶位移 10 mm 对应的荷载为 180 kN 的情况计算桩身弯矩, 采用张氏法、*C* 法和 *m* 法计算桩身弯矩分布如图 3 所示。比较不同估算方法桩身最大弯矩的大小和位置, 如表 2 所示。*m* 法与 *p*-*y* 曲线法计算弯矩比较接近, 张氏法与 *C* 法计算弯矩偏小。

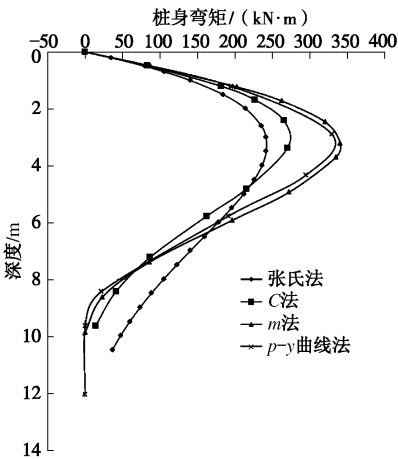


图 3 灌注桩桩身弯矩分布曲线

Fig. 3 Curves of distribution of bending moments of bored piles

表 2 灌注桩不同计算方法弯矩比较

Table 2 Comparison among bending moments of bored piles by different methods

计算方法	计算参数	参数取值	最大弯矩/(kN·m)	最大弯矩深度/m
张氏法	地基反力系数	10 MN/m ³	243	3.29
<i>C</i> 法	<i>c</i> 值	7 MN/m ^{3.5}	270	3.40
<i>m</i> 法	<i>m</i> 值	4 MN/m ⁴	341	3.20
<i>P</i> - <i>y</i> 曲线法	—	—	330	2.90
<i>N</i> - <i>L</i> 法	—	—	344	2.60

3.2 PHC 管桩

T3-DW 场地试桩采用 PHC-400-B 型, 试验土层为②层褐黄色粉质黏土, 该场地试验桩顶水平位移为 10 mm 对应的水平荷载 72.5 kN, 在此荷载水平下, 将采用张氏法、*C* 法和 *m* 法的桩身弯矩分布如图 4 所示。比较不同估算方法桩身最大弯矩的大小和位置, 如表 3 所示。

可以看出 *m* 法的计算结果与实测结果较为吻合, 采用张氏法与 *C* 法的桩身弯矩计算结果比实测较小, 只达到实测值的 70%, 最大弯矩点的深度比实测值要深 1 倍桩径左右。

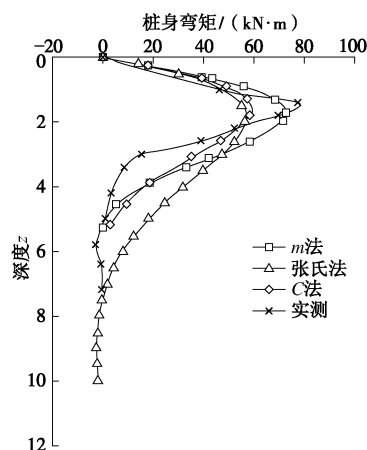


图 4 PHC 管桩桩身弯矩分布曲线

Fig. 4 Curves of distribution of bending moments of PHC pipe piles

表 3 PHC 管桩不同计算方法弯矩比较

Table 3 Comparison among bending moments of PHC pipe piles by different methods

计算方法	计算参数	参数取值	最大弯矩/(kN·m)	最大弯矩深度/m
张氏法	地基反力系数	13 MN/m ³	54.0	1.82
C 法	c 值	12 MN/m ^{3.5}	58.4	1.80
m 法	m 值	10 MN/m ⁴	72.6	1.70
实测			77.0	1.40

4 结 论

通过大量上海地区水平载荷试验对 m 法适用性以及桩身弯矩计算比较, 得到以下 3 点结论。

(1) 当缺少水平载荷试验资料时, 采用 m 法计算确定单桩水平承载力对上海软土地区建筑桩基是适用的, 计算桩身弯矩曲线与实测曲线比较吻合。

(2) m 法中计算参数取值, 根据水平位移 10 mm 对应的 m 值实测数据与规范中经验参数比较, 对上海软土地区, 建议可按上海市《地基基础设计规范》中规定范围的上限取用。重要工程或者水平承载要求较高时, 宜通过现场水平载荷试验获得该场地的 m 值。

(3) m 法计算得到的桩身弯矩最大值的位置和数值与实测结果都较为吻合; 相比较而言采用张氏法和 C 法计算的桩身弯矩比实测值要小, $p-y$ 曲线法、NL 法计算得到的桩身最大弯矩位置和数值都与 m 法桩身弯矩曲线基本重合, 但 m 法计算更为简便。

参考文献:

[1] 蔡忠祥, 刘陕南, 侯胜男. 基于混凝土损伤模型的单桩水平承载性状数值分析[J]. 工业建筑. 2012, 42(增刊): 303 - 307. (CAI Zhong-xiang, LIU Shan-nan, HOU Sheng-nan, et al. Numerical analysis of lateral response of the single pile based on the concrete damaged plasticity model [J]. Industrial Construction, 2012, 42(S0): 303 - 307. (in Chinese))

[2] 黄河洛口桩基试验研究组. 桩基在水平荷载作用下的破坏特征[J]. 人民黄河, 1985(4). (Test pile group of Yellow River Luokou, Failure characteristics of Pile foundation under the action of horizontal loadp[J]. Yellow River, 1985(4). (in Chinese))

[3] 侯胜男, 刘陕南, 孙洋波, 等. 预应力管桩水平承载力现场试验与计算研究[J]. 土木建筑工程信息技术, 2012, 4(4): 28 - 31. (HOU Sheng-nan, LIU Shan-nan, SUN Yang-bo, et al. Lateral capacity of phc pile on site test and calculation research[J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2012, 4(4): 28 - 31. (in Chinese))

[4] 上海现代建筑设计(集团)有限公司. 上海软土地区建筑桩基水平承载力的确定方法研究报告[R]. 上海: 上海现代建筑设计(集团)有限公司. 2012. (Shanghai Xian Dai Architectural Design(Group)Co., Ltd. Research on the lateral bearing capacity of single pile of building pile foundation in Shanghai soft soil[R]. Shanghai: Shanghai Xian Dai Architectural Design(Group)Co., Ltd., 2012. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)