

文章编号: 1673-9469(2011)02-0014-05

泉州市区 PHC 桩竖向抗拔极限承载力预测

卓维松

(福建交通职业技术学院 交通土建工程系, 福建 福州 350007)

摘要: 根据泉州市区 6 根现场试验桩的实测资料, 对 PHC 桩上拔荷载—桩顶位移曲线进行拟合分析。基于 1stOpt 操作平台, 选用 Levenberg—Marquardt 结合 Universal Global Optimization—UGO 的拟合方法, 选用双曲线模型、幂函数模型和双曲线幂函数组合模型对 6 根现场试验桩的拟合。结果表明双曲线幂函数组合模型的拟合精度最高, 相关系数 R 超过 0.999 9, 基于该数学模型的 PHC 桩上拔荷载的计算值与实测值的误差一般为 -0.48% 至 0.55%; 相对于试验报告给出的单桩竖向抗拔极限承载力为 1 400kN, 根据拟合曲线预测的结果均有不同程度的提高, 最高达 59.13%。

关键词: 泉州市区; PHC 桩; 竖向抗拔极限承载力; 双曲线幂函数组合模型; 预测

中图分类号: TU413.4

文献标识码: A

A prediction on ultimate vertical uplift bearing capacity of PHC pile in Quanzhou downtown area

ZHUO Wei-song

(Civil Engineering Department, Fujian communications technology College, Fujian Quanzhou 350007, China)

Abstract: Based on the measured data of six field test piles in Quanzhou downtown area, the optimizing fit analysis was conducted on the pile cap displacement curve of up drag for PHC Pile. Through software platform 1stOp, Levenberg—Marquardt was first combined with Universal Global Optimization—UGO as the fitting method; then the six field test piles were fitted by means of hyperbolic curve model, power function model and compound model of hyperbolic curve power function. The results showed that the fitting accuracy of compound model of hyperbolic curve power function was the highest, and all its correlation coefficient R was above 0.999 9. Besides, such model had a better fitting effect on the uplift of PHC Pile than that of hyperbolic curve model and power function model. Generally, the error of calculated value and measured value for up drag of PHC Pile grounded on the mathematic model was between -0.48% and 0.55%. Yet compared with the value 1 400kN of ultimate vertical uplift bearing capacity of a single pile from the test report, together with the predicted result according to the fitting curve, the result was more or less improved with the highest value 59.13%. Thus, the pile cap displacement curve of up drag for PHC Pile was fitted via the compound model of hyperbolic curve power function and the prediction was conducted on ultimate vertical uplift bearing capacity of a single pile, the result of which is relatively accurate and reliable.

Key words: Quanzhou downtown area, PHC pile, ultimate vertical uplift bearing capacity, compound model of hyperbolic curve power function, prediction

在实际工程中, 设计者往往仅凭经验偏于保守地计取单桩承载力设计值, 而后的试桩又仅计

取 2 倍的该设计值作为最大试桩荷载, 其真实用意并非是想得出真正的基桩承载力, 而是仅想验

证一下所取设计值是否安全而已。再加上试验设备与费用以及施工进度要求等原因, 结果往往是做不到极限承载力所对应的沉降值, 因此难以得出真正符合规范^[1]要求的单桩极限承载力数值。因此, 工程实际迫切需要在理论上给出一种利用有限的桩顶上拔荷载 Q 与上拔位移 s (后文简称 $Q-s$) 的观测数值来预测单桩竖向抗拔极限承载力的方法。而对此, 前人已做了大量的研究工作, 但其成果是否适合泉州复杂软土地区不可而知, 本文通过对泉州市区 PHC 桩抗拔试验数据及

其地质勘察报告的分析研究, 给出一套切实可行并适合本地区 PHC 桩竖向抗拔极限承载力的预测方法。

1 静载试验及其分析

基于泉州市区某具有代表性工程的 6 根 PHC 桩的抗拔试验数据和地质勘察报告, 表 1 给出试验所在工程场地的土层分布及主要物理力学指标, 6 根试验桩基本资料见表 2。

表 1 试验所在工程场地的土层分布及主要物理力学指标、桩基参数

Tab. 1 Soil distributions main physical mechanics indexes and pile foundation parameters for test project sites

层号	土层	天然重度 $r/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	天然含水量 $w/\%$	天然孔隙比 $e/\%$	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	抗剪强度		压缩模量 E_s/MPa	地基承载力特征值 f/kPa	预制桩 q_{sk}/kPa	预制桩 Q_{pk}/kPa
							c/kPa	$\Phi/(\text{°})$				
1	杂填土	18.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2-1	粉质粘土	19.5	26.8	0.761	15.5	0.27	26.7	14.1	5.75	160	15	—
3	淤泥	16.0	64.2	1.704	26.4	1.31	6.7	6.2	1.80	60	12	—
2-2	粉质粘土	19.5	29.6	0.804	15.6	0.39	24	13.7	5.28	170	55	—
4	中砂	18.4	—	—	—	—	—	—	—	190	60	6 300
5	砂砾卵石	20.8	—	—	—	—	—	—	—	420	120	8 000

表 2 试桩基本资料

Tab. 2 Basic data for the test pile

桩号	试验日期	桩径 $/\text{mm}$	入土深度 $/\text{m}$	混凝土 标号	桩端 持力层
Z2	2007-7-6	500	18.1	C80	中砂
Z3	2007-7-9	500	20.0	C80	中砂
Z4	2007-7-11	500	21.5	C80	砂砾卵石
Z5	2007-7-14	500	22.3	C80	砂砾卵石
Z6	2007-6-30	500	22.3	C80	砂砾卵石

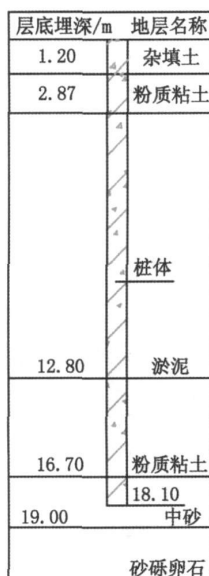


图 1 试验桩 Z2 剖面示意图

Fig. 1 Diagrammatic section of test pile Z2

图 1 为试验桩 Z2 剖面示意图, 6 根竖向抗拔静载试验桩的 $Q-s$ 曲线如图 2 所示。由图 2 可以看出, $Q-s$ 曲线属于缓变型, 随着荷载的增加, 桩的沉降变形随之增加, 但没有明显的反弯点, 即使施加荷载达到最大值 1 400kN, 桩的沉降量仅为 20.45mm ~ 38.08mm, 根据图 2 曲线的分布规律, 可以判定试桩竖向抗拔极限承载力大于 1 400kN。

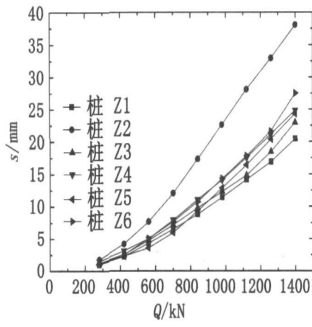


图2 Q-s 曲线图

Fig. 2 Q-s Curves

2 试验数据曲线拟合及其分析

2.1 拟合数学模型描述

目前描述桩的荷载—位移关系曲线的数学模型较多^[2-5],主要有双曲线模型、指数模型、抛物线模型、幂函数模型、双曲线幂函数组合模型等。本文仅选取应用较广泛的双曲线模型、幂函数模型、双曲线幂函数组合模型进行拟合。

双曲线模型是应用最广泛的一类模型,它的方程式为

$$Q = c_1 s / (c_2 + s) \tag{1}$$

式中 Q —上拔荷载; s —桩顶沉降; c_1 、 c_2 —参数。

幂函数模型方程为

$$Q = f_1 (1 - (1 + f_2 s)^{f_3}) \tag{2}$$

双曲线幂函数组合模型方程为

$$Q = p_1 s / (p_2 + s) + p_3 (1 - (1 + p_4 s)^{p_5}) \tag{3}$$

2.2 拟合方法和拟合工具选择

在非线性曲线拟合,参数优化方面,应用较广的软件有诸如 OriginPro, Matlab, SAS, SPSS, DataFit, GraphPad, TableCurve2D, TableCurve3D 等,最常用算法有 Levenberg—Marquardt 或 Simplex—Method 等,均可归属于局部最优法。1stOpt 软件在非线形回归,曲线拟合,非线性复杂模型参数估算求解,线性/非线性规划等领域傲视群雄,用户勿需给出参数初始值,而由 1stOpt 随机给出,通过其独特的全局优化算法,最终找出最优解。

鉴于此,本文拟合工具选用 1stOpt 软件,拟合方法选择 Levenberg—Marquardt 结合 Universal Global Optimization—UGO,对试验数据进行拟合计算。

2.3 拟合结果

6根 PHC 桩 $Q-s$ 曲线的双曲线模型、幂函数模型和双曲线幂函数组合模型拟合结果如图 3 所示,拟合曲线参数和相关系数见表 3。

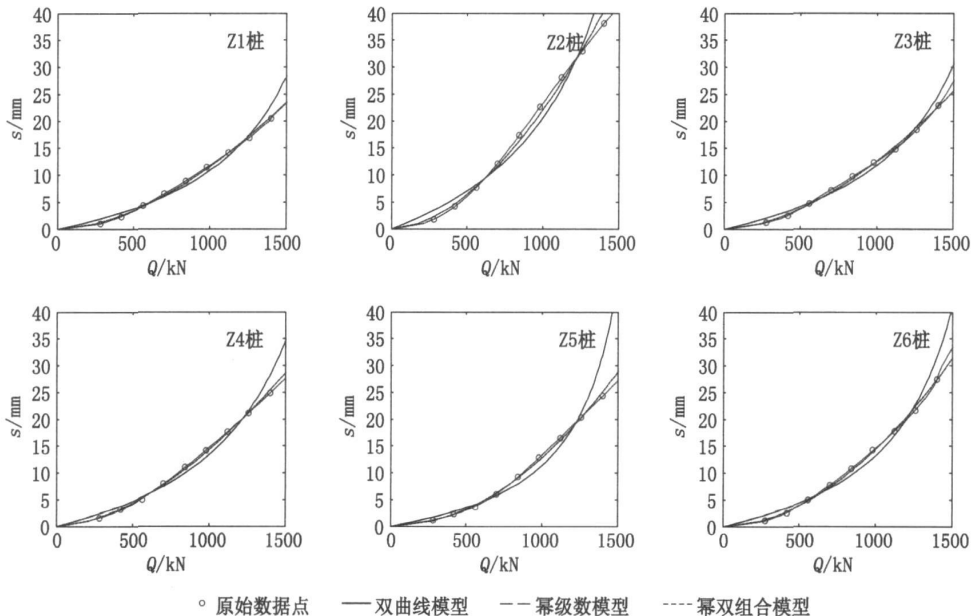


图3 Q-s曲线的双曲线模型、幂函数模型和双曲线幂函数组合模型拟合图

Fig. 3 The fitting chart for Q-s curves of hyperbolic model, power function model, and compound model of hyperbolic power function

表 3 拟合结果
Tab. 3 Fitting results

桩号	双曲线模型			幂函数模型					双曲线幂函数组合模型				
	c_1	c_2	R_1	f_1	f_2	f_3	R_2	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	R_3
Z1	2 171.94	12.65	0.990 1	$-0.001 2$	2.14×10^9	0.57	0.998 7	348.49	0.59	$-4 204.19$	0.04	0.41	0.999 9
Z2	2 074.41	22.15	0.986 0	$-0.001 0$	2.52×10^9	0.56	0.997 2	$-1 165.36$	-114.43	-266.01	9.27	0.24	0.999 9
Z3	2 202.16	14.21	0.992 0	$-0.001 3$	1.43×10^9	0.57	0.998 8	4 494.03	4.63	$-2 341.28$	-0.02	16.53	0.999 9
Z4	2 189.35	15.89	0.991 8	$-0.000 8$	2.17×10^9	0.58	0.999 3	$-3 668.44$	8.28	$-87 018.11$	0.45	0.02	0.999 9
Z5	1 794.25	9.00	0.988 1	$-0.009 8$	8.45×10^8	0.50	0.998 8	$-3 697.83$	21.71	-921.57	1.38	0.43	0.999 8
Z6	1 973.42	12.91	0.989 0	$-0.013 3$	1.26×10^8	0.53	0.999 0	3 483.46	59.67	303.22	0.36	-3.83	0.999 9

注: R_1 、 R_2 、 R_3 分别为双曲线模型、幂函数模型和双曲线幂函数组合模型拟合的相关系数。

表 4 桩 Z2 上拔荷载拟合值的三种模型比较
Tab. 4 Comparisons among three models of the up-pull load fitting value for Pile Z2

桩顶位移 /mm	上拔荷载 实测/kN	双曲线模型		幂函数模型		双曲线幂函数组合	
		拟合值/kN	相对误差	拟合值/kN	相对误差	拟合值/kN	相对误差
0.00	0.00	0.00	—	0.00	—	0.00	—
1.76	280.00	152.69	-45.47%	243.01	-13.21%	279.21	-0.28%
4.20	420.00	330.64	-21.28%	395.17	-5.91%	422.32	0.55%
7.66	560.00	533.04	-4.81%	552.92	-1.26%	559.29	-0.13%
12.04	700.00	730.50	4.36%	711.94	1.71%	696.66	-0.48%
17.33	840.00	910.57	8.40%	872.69	3.89%	842.36	0.28%
22.60	980.00	1 047.63	6.90%	1 012.32	3.30%	980.02	0.00%
28.09	1 120.00	1 159.83	3.56%	1 143.17	2.07%	1 123.48	0.31%
32.95	1 260.00	1 240.50	-1.55%	1 249.83	-0.81%	1 254.87	-0.41%
38.08	1 400.00	1 311.53	-6.32%	1 355.12	-3.21%	1 401.77	0.13%

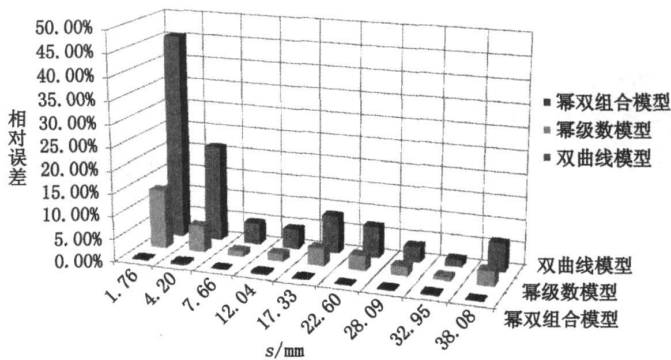


图 4 桩 Z2 上拔荷载拟合值的三种模型相对误差绝对值比较

Fig. 4 Comparisons of relative error absolute value among three models of the up-pull load fitting value for Pile Z2

从图3和表3上可发现,基于1stOpt操作平台,选用Levenberg-Marquardt结合Universal Global Optimization-UGO的拟合方法,三种模型拟合精度都很高,双曲线模型拟合相关系数达0.9860以上,幂函数模型拟合相关系数达0.9972以上,双曲线幂函数组合模型拟合相关系数达0.9999以上;相对于双曲线幂函数组合模型,双曲线模型、幂函数模型的拟合精度会稍微不够理想,主要体现在曲线的尾部,且双曲线模型的拟合精度不如幂函数模型。

从表4和图4更能看出双曲线幂函数组合模型的优越性。表4显示,对双曲线幂函数组合模型,桩S2上拔荷载拟合值的相对误差为 $-0.48\% \sim 0.55\%$;对双曲线模型,相对误差为 $-45.47\% \sim 8.40\%$;对幂函数模型,相对误差为 $-13.21\% \sim 3.89\%$ 。

3 确定单桩极限承载力

表5 模型预测结果比较

Tab. 5 Comparisons for model predicting results

桩号	最大沉降量/mm	单桩竖向抗压极限承载力测/kN	双曲线幂函数组合	
			拟合值/kN	相对误差
Z1	20.45	1400	2227.77	59.13%
Z2	38.08	1400	1459.69	4.26%
Z3	22.94	1400	1686.94	20.50%
Z4	24.83	1400	1864.07	33.15%
Z5	24.32	1400	1961.09	40.08%
Z6	27.48	1400	1701.20	21.51%

考虑到试桩 $Q-s$ 曲线呈缓变形,宜采用位移控制法确定单桩极限承载力,即根据有关规范要求取桩顶位移为某一数值所对应的荷载为单桩极限承载力《建筑桩基技术规范》(JGJ94-94)规范^[6],对试桩 $Q-s$ 曲线呈缓变形的,可取桩顶位移40~50mm对应的荷载为单桩极限承载力,桩顶位移值取40mm,根据式(1)~式(3)可求得单桩极限承载力,计算结果见表5。由表5可知,相对于

试验报告给出的单桩竖向抗拔极限承载力值1400kN,根据拟合曲线预测的结果,6根桩竖向抗拔极限承载力均有不同程度的提高,最高达59.13%。

4 结论

1)6根现场试验PHC桩的 $Q-s$ 曲线是缓变型。

2)三种模型拟合精度都很高,双曲线模型拟合相关系数达0.9860以上,幂函数模型拟合相关系数达0.9972以上,双曲线幂函数组合模型拟合相关系数达0.9999以上;相对于双曲线幂函数组合模型,双曲线模型、幂函数模型的拟合精度会稍微不够理想,主要体现在曲线的尾部,且双曲线模型的拟合精度不如幂函数模型。

3)基于双曲线幂函数组合模型的PHC桩上拔荷载的计算值与实测值的误差一般为 $-0.48\% \sim 0.55\%$;对双曲线模型,相对误差为 $-45.47\% \sim 8.40\%$;对幂函数模型,相对误差为 $-13.21\% \sim 3.89\%$ 。

4)相对于试验报告给出的单桩竖向抗拔极限承载力值1400kN,根据拟合曲线预测的结果均有不同程度的提高,最高达59.13%。

参考文献:

- [1] 贾志刚,刘凌云,王鸿飞. PHC管桩承载力试验分析[J]. 煤炭工程, 2008(8): 96-98.
- [2] 蒋建平,高广运,刘文白. 扩底桩上拔荷载一位移曲线的Richards模型拟合研究[J]. 工程力学, 2009, 26(5): 189-201.
- [3] 刘俊龙. 双曲线法预测单桩极限承载力的讨论[J]. 岩土工程技术, 2001(4): 206-217.
- [4] 许宏发,钱七虎,金丰年. 描述抗拔桩荷载一位移曲线的幂函数模型[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 549-554.
- [5] 党发宁,刘娜,何文安. 西安地区单桩荷载传递双曲线模型与工程应用[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1428-1432.
- [6] JGJ94-2008. 建筑桩基技术规范[S].

(责任编辑 刘存英)