

文章编号:1007-2993(2005)05-0254-04

挤扩支盘桩极限承载力的预测

高笑娟^{1,2} 杨晓斌³

(1. 河南科技大学建筑工程学院, 洛阳 471003; 2. 浙江大学岩土所, 杭州 310027; 3. 机械工业部第四设计院, 洛阳 471039)

【摘要】 用双曲线方法对 110 根挤扩支盘桩的极限承载力进行预测, 并与直杆桩预测结果进行对比。结果表明由于支盘桩受力性状复杂, 加载前期和中期预测精度较高, 后期较低, 误差超过 15%; 支盘桩的沉降曲线出现台阶时预测值与实测值误差较大; 支盘桩极限承载力的预测精度与工程地质条件和桩本身的参数密切相关, 桩身参数和地质条件相同条件下各桩预测精度比较接近。总体上直杆桩的预测结果优于支盘桩。

【关键词】 双曲线法; 挤扩支盘桩; 极限承载力

【中图分类号】 TU 473

Forecasting Ultimate Bearing Capacity of Single Squeezed Branch Pile

Gao Xiaojuan^{1,2} Yang Xiaobin³

(1. Institute of Architecture Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471003 China;

2. Institute of Geotechnique Engineering, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027 China;

3. Fourth Design and Research Institute, Ministry of Machine-Building Industry, Luoyang Henan 471039 China)

【Abstract】 This paper predicated the ultimate bearing capacity of squeezed branch pile based on 110 pile from different site by hyperbola method, and compare with the results of the friction pile's. The results show that predicated curve is agree well with the filed measurement curve below ultimate load. The difference between the two curves is increasing when the top load of pile is approach to the ultimate load. The degree of error can not be constrained in 15% because of the complex transfer mechanism of this kind of pile. The predicated results of friction pile are better than that of squeezed branch pile. The precision is greatly relative to the condition of the property of soil and pile itself.

【Key Words】 hyperbola method; squeezed branch pile; ultimate bearing capacity

0 引言

单桩静载荷试验是确定单桩极限承载力的最直观、最可靠的方法之一, 也是我国规范^[1,2]规定的方法。在工程实践中, 由于荷载装置、试桩费用、工程施工进度以及试验终止条件等限制, 未能将试桩压至破坏, 所得的 $P-s$ 曲线是不完整的, 不能直接得到单桩极限承载力。此时, 如何利用已获得的实测数据, 合理地预测单桩极限承载力, 具有重大意义^[3]。对此, 国内外学者进行了大量研究, 提出了多种数学模型预测方法。常用的有指数方程法、对数曲线法、抛物线法、灰色预测法等, 其中双曲线法是比较简单、适用、拟合精度较高的方法之一。但是以前对桩承载力的预测只限于对传统桩型, 支盘桩是一种新的桩型, 其荷载传递性状比较复杂, 目前对它的极限承载力一般是通过单桩静载荷试验的方法确定的, 通过预测的方法来确定支盘桩的极限承载

力的有关研究还比较少。这些理论上的方法能否适用于支盘桩, 用这些方法预测的结果究竟是否可靠, 都不得而知。因此, 用预测方法估计支盘桩的极限承载力就具有十分重要的现实意义。

1 双曲线法的基本原理^[4]

假设试桩的 $P-s$ 曲线符合双曲线方程:

$$P = \frac{s}{ks + c} \quad (1)$$

式中: P 为桩顶荷载, kN; s 为桩顶沉降, mm; k, c 为拟合参数。

则桩的极限承载力 P_u 为

$$P_u = \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{s}{ks + c} = \frac{1}{k} \quad (2)$$

经变换, 式(1)可以写成 $\frac{s}{P} = ks + c$

$$\text{令 } y = s/P, x = s, \text{ 则 } y = kx + c \quad (3)$$

根据最小二乘法原理, 可以求出

基金项目: 河南省科技攻关项目(991150103)

作者简介: 高笑娟, 1973 年生, 女, 河南偃师人, 讲师, 在读博士研究生, 主要从事地基基础方面的研究。

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2} = \frac{l_{xy}}{l_{xx}}$$

$$c = \bar{y} - k \bar{x}$$

$$\text{相关系数 } \gamma = \frac{l_{xy}}{\sqrt{l_{xx}} \sqrt{l_{yy}}}$$

$$\text{其中: } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

$$l_{yy} = \sum_{i=1}^n y_i^2 - n \bar{y}^2$$

上述方法是假定位移趋于无穷大时对应的荷载为极限荷载(确切地说为破坏荷载),须再乘以经验性的修正系数(约为0.8~0.9^[5]或0.7~0.9^[6]),才得到外推的极限承载力,本文取0.85。

按照式(1)~式(3),求出 $P = l/k$ 即为初步预测的极限承载力,在此基础上乘以折减系数0.85,所得的荷载值作为预测极限承载力 $P_f = 0.85P$,与桩的实测极限承载力 P_u 进行对比,误差 $e = (P_f/P_u - 1) \times 100\%$ 。

2 预测结果分析

本次收集到的来自河南、天津、北京、浙江、江苏等地的不同工程地质条件、不同尺寸的110根支盘

桩的试桩资料,除了1~7号桩为作者收集的河南省的现场实测资料,其他的103根桩来自文献^[7]。其中试桩资料完整的(桩顶沉降超过40 mm,或沉降虽然没有超过40 mm但达到了极限承载力的)桩共有44根。

预估时首先验证拟合双曲线对支盘桩 $P-s$ 曲线的接近程度,拟合的过程中根据双曲线法的使用范围剔除开始加载时曲线基本呈直线的几级荷载和桩接近破坏的几级荷载。通过对110根支盘桩的 $P-s$ 曲线进行拟合,结果表明 $s/P-s$ 直线的相关系数 γ 都接近于1, s/P 与 s 的线性关系较好。拟合双曲线与实测曲线在加载的前期和中期吻合较好,加载后期多数曲线出现不同种度的偏离。但是预测极限荷载的一半对应的桩顶沉降较小,而且在此范围内,两曲线比较接近。因此,如果取安全系数为 $k=2$,即预测极限荷载的一半作为桩顶容许承载力是能够满足工程要求的。

桩顶沉降的取值方法为:试桩的沉降没有达到40 mm,也没有达到极限承载力的,按照最后一级荷载对应的沉降;沉降小于40 mm但是达到极限承载力的,取极限承载力对应的沉降;沉降超过40 mm的,则取40 mm的前一级沉降值。计算结果见表1。

表1 双曲线法预测成果表

序号	支数/盘数	最大加载/kN	对应沉降/s/mm	实测极限值 P_u /kN	预测极限值 P_f /kN	P_f/P_u	序号	支数/盘数	最大加载/kN	对应沉降/s/mm	实测极限值 P_u /kN	预测极限值 P_f /kN	P_f/P_u
1	1/2	3 900	37.89	3 600	3560	0.988 889	56	0/3	8 000	43.32	8 000	8 746	1.093 25
2	1/2	3 600	37.5	3 200	3 390	1.059 375	57	0/3	7 200	46.45	7 200	7 281	1.011 25
3	1/2	3 600	40.51	3 200	3 160	0.987 5	58	0/3	2 720	48.77	2 400	2 207	0.919 583
4	0/2	4 700	4.49	4 700	6 140		59	7/3	5 200	39.198	5 200	4 714	0.906 538
5	0/2	3 300	2.3	3 300	3 290		60	3/2	2 800	26.42	2 800	2 755	
6	0/2	3 300	2.46	3 300	3 490		61	4/4	1 500	80.24	1 300	1 158	0.890 769
7	0/2	3 300	1.5	3 300	3 860		62	2/2	2 640	57.47	2 400	2 264	0.943 333
8	0/3	6 800	13.67	6 800	6 680		63	3/3	6 000	28.87	6 000	6 875	
9	0/3	6 800	22.01	6 800	7210		64	1/3	6 000	25.11	6 000	7 175	
10	0/3	6 800	21.43	6 800	6 920		65	3/2	6 000	26.53	6 000	6 382	
11	0/3	6 800	22.6	6 800	6 820		66	3/2	3 350	27.75	3 350	3 383	
12	0/3	6 800	20.4	6 800	7 020		67	0/3	3 300	32.47	3 300	3 787	
13	0/3	7 700	23.81	7 700	14 960		68	0/3	7 000	16.91	7 000	7 448	
14	1/4	7 700	50.5	7 700	9 750	1.266 234	69	2/3	2 464	22.1	2 464	2 320	
15	1/4	7 700	27.88	7 700	8 900		70	0/2	2 464	20.34	2 464	2 414	
16	1/4	6 600	46.7	6 000	6 210	1.035	71	0/2	6 656	40.12	6 656	7 704	1.157 452
17	0/4	4 500	49.14	4 500	3 960	0.88	72	0/4	5 536	25.93	5 536	5 286	
18	2/2	4 500	22.31	4 810	4 010		73	0/4	5 824	33.6	5 824	8 322	
19	2/2	5 250	46.99	5 250	11 870	2.260 952	74	0/4	3 900	44.75	3 900	3 698	0.948 205
20	2/2	5 040	38.32	5 040	6 226		75	1/2	4 000	49.8	4 000	4 066	1.016 5

续表

序号	支数/盘数	最大加载/kN	对应沉降s/mm	实测极限值 P_u /kN	预测极限值 P_f /kN	P_f/P_u	序号	支数/盘数	最大加载/kN	对应沉降s/mm	实测极限值 P_u /kN	预测极限值 P_f /kN	P_f/P_u
21	1/3	5 400	32.18	5 400	6 912		76	1/2	3 800	47	3 800	4 698	1.236 316
22	1/3	5 400	41.23	5 400	6 963	1.289 444	77	0/3	2 400	11.97	2 400	3025	
23	1/3	7 700	43.7	7 700	1 5614	2.027 792	78	0/3	2 400	12.77	2 400	2 670	
24	2/4	7 700	37.1	7 700	10 014		79	0/3	2 400	7.06	2 400	4 680	
25	2/4	7 700	34.2	7 700	7 053		80	1/3	7 000	23.52	7 000	9 222	
26	2/4	3 300	70	3 000	2 985	0.995	81	1/3	7 000	16.49	7 000	9 756	
27	7/3	3 000	60	2 700	2 553	0.945 556	82	0/3	3 650	27.5	3 650	3 543	
28	7/3	2 700	36.8	2 400	2 532		83	0/3	3 550	56	3 550	2 952	0.831 549
29	7/3	2 700	58.1	2 400	2 370	0.961 25	84	0/3	3 550	61	3 550	3 235	0.911 268
30	7/3	7 200	40.8	7 200	7 238	1.005 278	85	2/2	6 400	100.98	6 400	7 092	1.098 281
31	6/2	7 200	57.6	6 600	6 306	0.955 455	86	6/1	4 800	10.61	4 800	7 992	
32	6/2	7 200	63.9	6 400	5 800	0.906 25	87	0/4	5 400	53.84	5 400	5293	0.980 185
33	2/2	8 000	95.61	7 200	7 234	1.004 722	88	0/4	6 600	71.71	6 600	6 077	0.920 758
34	2/2	9 200	89.71	8 000	8 656	1.070 125	89	0/4	6 600	109.91	6 600	6 034	0.914 242
35	2/2	6 300	128.31	5 250	5 056	0.963 048	90	1/3	2 200	5.36	2 200	2 472	
36	5/1	8 100	115.9	7 200	6 615	0.918 75	91	1/3	2 200	6.74	2 200	2 749	
37	5/1	7 200	97.7	6 400	5 938	0.927 813	92	1/3	2 200	6.78	2 200	4 753	
38	5/1	2 630	28.12	2 630	3 015		93	1/3	4 600	27.75	4 600	6 701	
39	3/1	2 500	2 614	2 500	2 605		94	0/4	4 800	23.36	4 800	6 110	
40	2/2	3 000	18.27	3 000	3 214		95	1/2	1 700	56.07	1 700	1 536	0.903 529
41	0/4	3 150	49.2	3 150	3 293	1.045 397	96	0/3	3 828	26.87	3 828	2 987	
42	0/4	3 150	29.63	2 800	2 490		97	0/3	4 003	40.81	4 003	3 746	0.935 798
43	0/4	3 150	34.35	3 150	3 275		98	0/3	2 620	25.52	2 620	2 285	
44	0/4	3 700	20.98	3 700	4 211		99	0/3	2 384	30.32	2 384	2 237	
45	0/4	3 700	9.3	3 700	3 555		100	0/4	2 986	33.63	2 986	3 253	
46	0/4	4 773	37.06	4 773	5 008		101	0/3	4 983	40.96	4 983	5 422	1.088 1
47	0/3	4 773	31.43	4 773	5 278		102	0/3	3424	27.28	3 432	3 474	
48	0/3	4 773	37.36	4 773	4 992		103	2/3	6 000	20.78	6 000	6 846	
49	0/3	1 700	11.18	1 700	1 572		104	2/3	6 000	39.34	6 000	7 027	1.171 167
50	0/2	1 700	12.56	1 700	1 478		105	1/2	4 600	8.68	4 600	5 532	
51	0/2	1 700	11.1	1 700	1 459		106	1/2	4 600	9.41	4 600	5 402	
52	0/2	5 845	16.66	5 500	7 852		107	1/2	650	5.76	650	1 326	
53	0/2	5 845	14.87	5 845	9 712		108	0/2	3 402	60.2	3 402	3 320	0.975 897
54	0/2	5 500	19.93	5 500	11 231		109	0/2	4 534	62.5	4534	5 003	1.103 441
55	0/2	7 600	37.76	7 600	6 873		110	0/2	3 172	47.5	3 172	3 034	0.956 494

总体误差分布见图 1。

图 1 说明双曲线法适用于扩挤支盘桩极限承载力的预测,虽然由于其受力过程复杂,部分桩预测误差较大(超过 15%),但总体误差变异系数为 0.004 195,数值较小。预测值具有较高的可靠度,能够满足工程上精度的要求。

对 44 根有完整的沉降曲线的桩的极限承载力进行预测,并把预测值 P_f 与实测值 P_u 进行对比。结果表明,除了 19# 和 23# 桩的预测极限承载力与实测极限承载力相差较大(P_f/P_u 分别为

2.260 952 和 2.027 792)外,其它桩的 P_f/P_u 的值均接近 1。排除这两根桩后所得误差均值为 1.002 833,标准差为 0.104 199,变异系数为 0.103 855。误差的分布见图 2。

19#、23# 桩的预测曲线与实测曲线吻合的很好,在加载范围内预测值与实测值比较接近,说明预测值是正确的。虽然桩顶沉降超过 40 mm,但是没有达到桩的极限承载力,因此预测值远远大于实测值。

由于支盘桩承载力的发挥过程比一般的桩型复

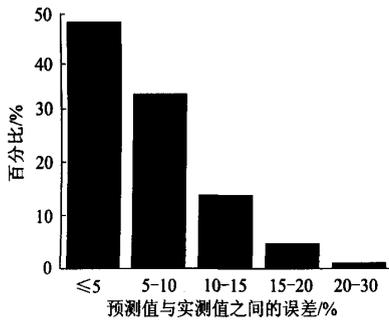


图1 总体预测误差分布图

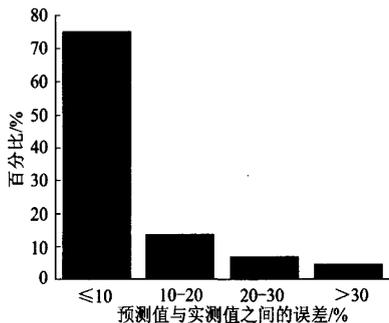


图2 44根桩预测误差分布图

杂的多,承载力的传递有比较明显的顺序性,当支盘的承载力逐步发挥时,沉降曲线有时会出现“台阶”。对于出现“台阶”的曲线,用双曲线法预测时会出现较大的偏差。但是用预测极限承载力作为桩的极限承载力是偏于安全的(见图3中96#桩预测曲线)。

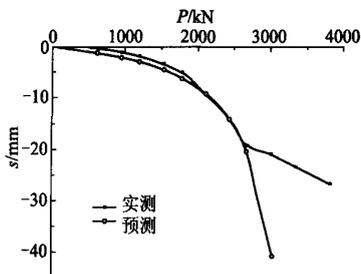


图3 96#桩沉降曲线

对桩顶沉降最小于15 mm的17根桩的极限承载力进行预测,误差在15%以内的有17根,占总桩数的100%,拟合的曲线与实测曲线吻合较好。说明只要超过桩顶荷载的比例界限值,在沉降较小(小于15 mm)时双曲线法也能得到比较满意的结果。如图4,107#桩预测曲线。

本文还对文献[7]中的7根直杆桩在沉降出现陡降段以前的曲线进行拟合,其结果优于支盘桩,误差在5%以内的有6根,最大误差为7.78%。总体上预测曲线与实测曲线的吻合程度高于支盘桩。这

是支盘桩的受力性状比普通直杆桩复杂的缘故。

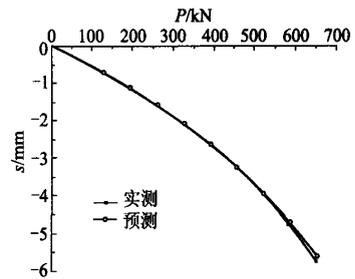


图4 107#桩沉降曲线

从表1还可以看出,预测极限承载力与实测极限承载力之间的逼近程度与工程地质条件和桩的基本参数密切相关。对同一工地上的桩,预测的精度比较接近。

3 结论

1)支盘桩的受力过程比较复杂,拟合的曲线与实测曲线在加载的前期和中期逼近程度较高,后期较低。对于沉降曲线出现“台阶”的支盘桩极限承载力预测值与实测值在有台阶的阶段偏离较大。

2)对于实测桩顶沉降小于15 mm的支盘桩,只要沉降超过P-s曲线比例界限值,用双曲线法预测也能得到比较精确的结果。

3)用双曲线法拟合桩的荷载沉降曲线,直杆桩的拟合结果优于支盘桩。这是由于支盘桩有多个支盘,其受力以及荷载传递的过程比普通直杆桩复杂的缘故。

4)拟合曲线与实测曲线的吻合程度与工程地质情况密切相关。一般情况下,同一工程地质条件的桩预测精度比较接近。

参考文献

- 1 JGJ 94—94 建筑桩基技术规范
- 2 GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范
- 3 邓志勇,陆培毅.几种单桩竖向极限承载力预测模型的对比分析.岩土力学,2002(4):428~431
- 4 祝龙根,刘利民,耿乃兴编著.地基基础测试新技术.北京:机械工业出版社,2002.147~148
- 5 王学武,赵国光.估算单桩竖向极限承载力的方法及应用.天津市政工程,2002(4):12~14
- 6 刘俊龙.用双曲线法预测单桩极限承载力的讨论.岩土工程技术,2001(4):204~207
- 7 徐至钧,张国栋编著.新型桩挤扩支盘灌注桩设计与工程应用.北京:机械工业出版社,2003:316~447