

文章编号: 1000-7598-(2008)02-507-06

超长 PHC 管桩桩顶沉降特性的动静对比分析

黄良机¹, 林奕禧¹, 蔡 健², 周万清²

(1. 珠海市建设工程质量监督检测站, 广东 珠海 519015; 2. 华南理工大学 建筑学院, 广州 510640)

摘 要: 通过静载荷试验可直接测到桩顶的荷载-沉降($Q-s$)曲线。由管桩内预先埋设的应变计的内力测试结果可计算出土阻力与桩-土相对位移的关系, 并进一步做高应变测试和拟合分析, 得出了高应变拟合的 $Q-s$ 曲线。对 $Q-s$ 曲线作动静结果对比分析, 探讨了在深厚软土中的超长 PHC 管桩的桩顶沉降特性。结果表明, 当荷载不大时, 高应变拟合的沉降大于静载实测的沉降, 但当荷载接近极限值时高应变的沉降小于静载的沉降。结果亦表明, 当超长 PHC 管桩桩身穿过一定深度的好土层、桩端进入全风化或更好的岩层时, 不管是静载试验还是高应变动力测试, 都很难使土阻力得到充分发挥, 此时静载实测的和高应变拟合的 $Q-s$ 曲线都呈缓变型特征。

关 键 词: 管桩; 超长桩; 沉降特性; 动静对比试验

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Dynamic and static comparative analyses of settlements of overlength PHC pipe piles

HUANG Liang-ji¹, LIN Yi-xi¹, CAI Jian², ZHOU Wan-qing²

(1. Zhuhai Municipal Construction Engineering Quality Supervision & Test Station, Zhuhai 519015, China;
2. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Based on the test results of prestressed high strength concrete(PHC) pipe piles by static and high strain dynamic load testing, $Q-s$ curves of test piles have been achieved; and the relation between the soil resistance and relative displacement between pile and soil is calculated through the stress test. Comparative analysis of the $Q-s$ curves between the dynamic and static load testing is made; and the settlement behavior of PHC pipe piles is discussed. Results show that the settlement of pile calculated by high strain dynamic load testing is higher than that of pile tested by static load testing when load is smaller; and it is smaller than the result of the static load testing when load gets larger. The results also show that the end bearing of the pile can not exert sufficiently when the pile driven into the full efflorescence granite or the higher intensity of the soil in spite of the dynamic or the static load testing; and the $Q-s$ curves of test piles have the character of slow transmutation.

Key words: pipe piles; overlength pile; settlement behavior; dynamic and static load testing

1 引 言

高应变动力试桩法(以下简称高应变)已应用了将近 30 年^[1,2], 国内外同行也进行了大量的单桩承载力的动静对比试验^[3,4], 个别研究者还对中等长度的预制方桩的荷载与沉降特性进行了动静对比分析^[5,6], 但对超长 PHC 管桩桩顶的荷载与沉降特性进行动静对比分析, 目前尚未见有报道。本文通过静载试验的桩顶沉降和桩身内力测试, 以及高应变的测试和拟合分析, 探讨了深厚软土中的超长 PHC 管桩在动静测试时的荷载与沉降特性。

2 工程地质概况

本次试验场地位于珠海市保税区内, 其原始地貌单元属于滨海堆积地貌, 场地内地基土在勘探深度内分为 5 个工程地质层, 即层①人工填土, 结构松散, 密实程度不均匀; 层②淤泥, 呈饱和、流塑状态; ②-1 细砂透镜体, 呈饱和、松散状态; 层③砂质黏性土, 系花岗岩原地风化而成, 原岩结构较清晰, 呈饱和、可塑状态; 层④全风化花岗岩, 绝大部分矿物已风化成土状, 可见残余结构, 手握有砂感, 岩芯呈土柱状; 层⑤强风化花岗岩。主要物理力学性质指标见表 1。

收稿日期: 2006-09-20

基金项目: 珠海市科技项目三项费用资助课题(No. PA200310064)。

作者简介: 黄良机, 男, 1965 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事地基基础方面的检测和研究工作。E-mail: h13809230572@yahoo.com.cn

表 1 地基土主要物理力学性质指标平均值
Table 1 Physical and mechanical properties of soils

层序	土层名称	层底埋深 / m	层厚 / m	含水率 w / %	天然重度 γ / $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	孔隙比 e	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	凝聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / ($^\circ$)
①	人工填土	2.8	2.8							
②	淤泥	10.2	7.4	63.0	16.1	1.729	22.7	1.39	9	1.4
②-1	细砂透镜体	11.8	1.6							
②	淤泥	40.7	28.9	63.0	16.1	1.729	22.7	1.39	9	1.4
③	砂质黏性土	53.1	12.4	25.2	18.3	0.840	16.7	0.07	27	20.9
④	全风化花岗岩	58.0	4.9							

3 试验概况

3.1 试验方案

试验采用直径为 400 mm、壁厚 95 mm 的 PHC 管桩，共 9 根，平面布置见图 1，其中 1[#]、7[#]和 4[#]的配桩桩长 36 m，2[#]、8[#]和 5[#]的配桩桩长 48 m，3[#]、9[#]和 6[#]的配桩桩长为 54 m。由于部分桩用于水平试验，与本文无关，因此下文只分析与本文有关的 2[#]~4[#]，7[#]~9[#]桩共 6 根桩。

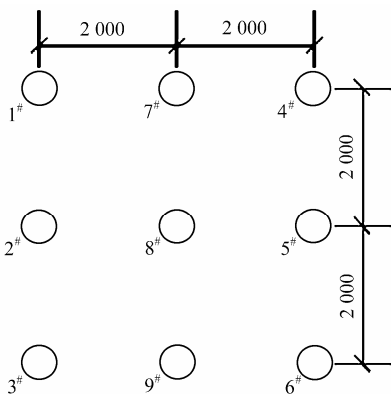


图 1 试桩平面布置图 (单位: mm)
Fig.1 Ground plan of the test piles (unit: mm)

对 2[#]~4[#]和 9[#]桩进行单桩静载荷试验，又对 7[#]~9[#]桩进行高应变动力测试，将具有相同桩长的桩的测试结果进行动静对比分析。

为分析在静载荷试验时桩身轴力和桩身变形的变化规律，试验在 2[#]~4[#]桩的桩壁内埋设有应变计，其中 4[#]桩布置了 34 个应变片测试断面，2[#]桩布置了 40 个应变片测试断面，3[#]桩布置了 43 个应变片测试断面，9[#]桩部分桩段也布置有应变片测试断面。每个断面成对埋设了水平净距为 320 mm 的 2 个应变计。

在测试元件的埋设方面，本次试验没有采用传统的先将桩打入土中，再把带有测试元件的钢筋笼放入管桩内腔，然后用细石混凝土填筑的方法^[7]，

而是采用在管桩制作阶段就将测试元件埋入管桩桩壁混凝土内的方法，这种方法不需要对管桩填芯，避免了填筑的钢筋混凝土对管桩刚度的影响^[8]，从而使试验得到的桩身压缩量和桩顶沉降性状更接近工程实际。

3.2 试验桩施工及试验

试验桩采用 D50 型柴油锤打桩机施打，施工参数见表 2。

表 2 试验桩施工参数表
Table 2 Construction parameters of test piles

桩号	配桩 桩长/ m	入土 深度/ m	打桩锤参数		总锤数 / 击	贯入度 / 毫米 (10 锤) ⁻¹	桩端 持力层
			锤重/ t	落距/ m			
4 [#]	36	36.5	5	1.5	47	2 000	淤泥
7 [#]					60	1 600	
2 [#]	48	48.5	5	1.5	121	700	砂质
8 [#]					171	600	黏性土
3 [#]	54	54.5	5	1.5	703	180	全风化
9 [#]					305	280	花岗岩

试验桩施工后休止期超过 90 d 后才开始试验。静载荷试验采用常规的平台堆载法堆载、慢速维持荷载法加载的方法^[9]，通过桩顶的位移传感器，测定各级荷载作用下的桩顶沉降，了解桩的沉降特性。同时，通过埋设在桩身的应变片，测定各级荷载作用下的桩身应变，计算各测试断面的桩身轴力，从而计算出桩侧摩阻力、桩端阻力和桩-土相对位移的关系。

高应变动力测试采用 PAK 型打桩分析仪，自由落锤锤击，采用经纬仪实测贯入度。

4 试验结果及分析

4.1 静载荷试验的 $Q-s$ 曲线

静载荷试验所得的荷载-沉降 ($Q-s$) 曲线如图 2 所示。另外，根据内力测试结果还可计算出与单桩极限承载力相对应的桩侧摩阻力和桩端阻力，见表 3。

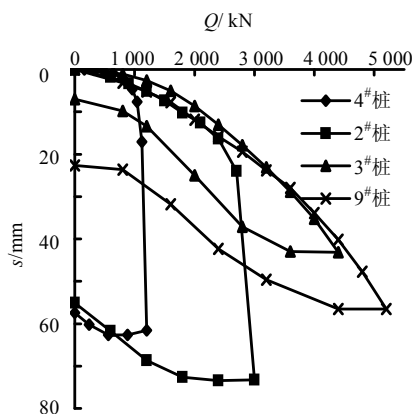


图2 静载荷试验 $Q-s$ 曲线
Fig.2 $Q-s$ curves of static load testing

表3 静载荷试验及内力测试结果表
Table 3 Force results of static load testing

桩号	最大荷载 /kN	桩顶沉降量 /mm	单桩极限承载力/kN			$Q-s$ 曲线陡降段起点对应沉降量/mm
			总阻力	摩阻力	端阻力	
4 [#]	1 200	61.55	1 040	921	119	7.62
2 [#]	3 000	73.26	2 700	2 036	664	24.02
3 [#]	4 400	43.12	<4400	<4232	<168	缓变型曲线
9 [#]	5 200	56.55	<5200	<4332	<868	无陡降段

由图 2 可见, 4[#]桩和 2[#]桩试验已达到破坏状态, $Q-s$ 曲线呈陡降型特征, 表现出典型的摩擦型桩特性, 其单桩极限承载力可取陡降段起点所对应的荷载值。由表 3 可见, 4[#]桩的摩阻力占总阻力的 89%, 2[#]桩的摩阻力占总阻力的 75%, 与 $Q-s$ 曲线所反映的摩擦型桩特性相一致。同时, 2 根桩端阻力大小的不同也反映了其桩端持力层的不同, 2[#]桩桩端持力层为砂质黏性土, 4[#]桩桩端持力层为淤泥, 2[#]桩桩端阻力约为 4[#]桩的 6 倍。

由图 2 亦见, 3[#]桩和 9[#]桩在试验荷载已很大、桩身混凝土应力水平已很高的情况下 (如 9[#]桩桩身混凝土应力已达 57.1 MPa), 地基土仍未达到极限状态, $Q-s$ 曲线呈缓变型特征, 如果桩身混凝土强度能够继续承受更大的荷载, 则这 2 根桩的地基土承载力还有进一步发挥的潜力。由表 3 也可看出, 3[#]桩的桩端阻力比 2[#]桩的还要小, 9[#]桩的桩端阻力也只是比 2[#]桩的略大些, 这与 3[#]桩和 9[#]桩的桩端持力层为全风化花岗岩的情况不符, 说明这 2 根桩的桩端阻力尚未达到极限状态。另外, 由表 3 还可算得 3[#]桩和 9[#]桩的摩阻力占总阻力的比例分别为 96% 和 83%, 也是属于典型的摩擦型桩。但是, 由于这 2 根均属超长桩, 进入好土层有约 14 m 且桩端最终进入全风化花岗岩, 试验难以使土阻力达到极限状态, 因此试验所得到的桩顶沉降主要由桩身压缩引起, $Q-s$ 曲线未出现陡降段。

4.2 高应变实测力和速度曲线

高应变动力测试的主要参数见表 4, 实测力和速度曲线如图 3 所示 (图中 L 为桩长, c 为坡速)。由图 3 和表 4 可见, 7[#]桩第 1 击信号已测到明显的桩底反射, 实测贯入度为 3 mm, 说明该桩土阻力已被充分激发; 9[#]桩采用了第 4 击的信号, 仍未测到桩底反射, 实测贯入度仅为 0.2 mm, 土阻力未被充分激发, 但如需测到桩底反射和适合的贯入度, 可能需要不断锤击, 而如果锤击数过多, 桩侧土将会受到较大扰动, 桩侧阻力反而会下降。可见, 对于进入好土层有一定深度且桩端最终进入全风化或更好岩层的超长桩, 高应变测试也和静载试验一样, 很难将土阻力充分激发。

表4 高应变动力测试主要参数表
Table 4 Parameters of test piles in dynamic load testing

桩号	试验重锤参数		测点处实测参数			实测贯入度 /mm
	锤重 /t	落距 /m	最大冲击力 /kN	最大速度 /m·s ⁻¹	最大动位移 /mm	
7 [#]	3.5	1.0	2 215	2.23	12	3.0
8 [#]	6.5	1.0	3 353	3.29	21	3.0
9 [#]	6.5	1.6	4 461	4.50	26	0.2

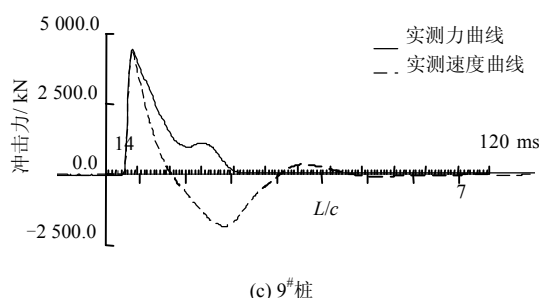
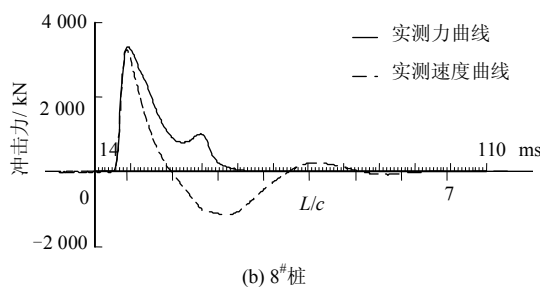
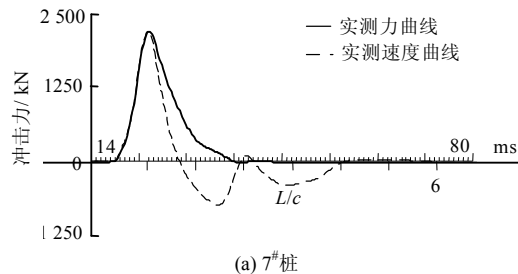
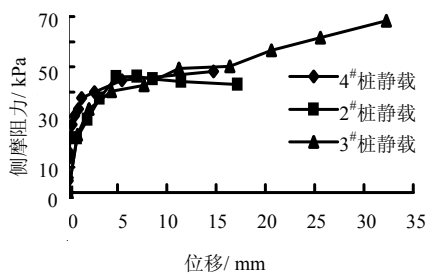


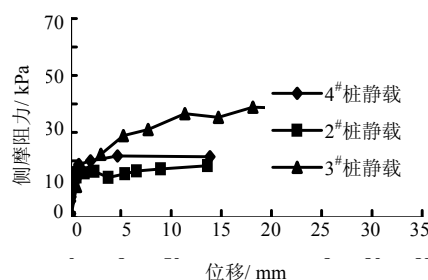
图3 高应变实测曲线
Fig.3 High strain dynamic test curves

4.3 高应变拟合分析弹限值的确定

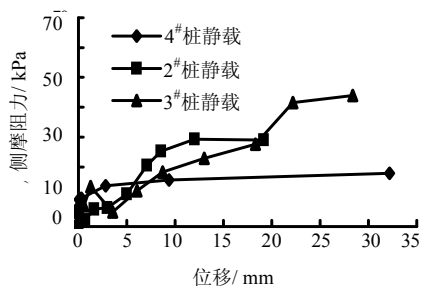
根据静载试验结果,可以计算出桩侧阻力、桩端阻力与桩-土相对位移的关系,见图 4~6。根据图中的曲线变化趋势,可以确定高应变拟合分析时各土层采用的弹限值,见表 5。由表 5 可见,9#桩在砂质黏性土下部和全风化花岗岩的桩侧弹限以及桩端弹限均偏小,说明该桩检测时所激发的桩-相对位移偏小。



(a) 淤泥上部



(b) 淤泥中部



(c) 淤泥下部

图 4 淤泥桩侧阻力与桩-土相对位移曲线

Fig.4 Curves of lateral friction resistance and pile-soil relative displacement of test piles in silty clay

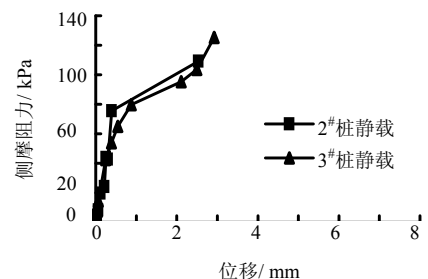


图 5 砂质黏性土桩侧阻力与桩-土相对位移曲线

Fig.5 Curves of lateral friction resistance and pile-soil relative displacement of test piles in sand clay

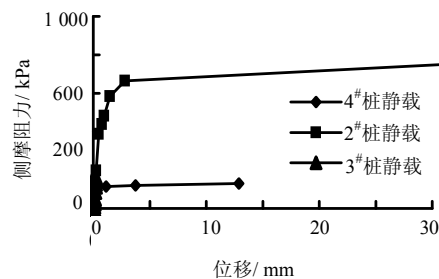


图 6 桩端阻力与桩端沉降关系曲线

Fig.6 Curves of end resistance and end displacement

表 5 用于高应变拟合分析的弹限值

Table 5 Elastic limit of high strain dynamic load testing

桩号	桩侧弹限 Q_s					桩端弹限 Q_T
	淤泥上部	淤泥中部	淤泥下部	砂质黏性土	全风化花岗岩	
7#	3.5	2.0	1.0			1.0
8#	5.0	2.0	5.0	5.0		3.0
9#	6.5	6.5	6.5	5.0~1.0	1.0	1.0

4.4 高应变拟合分析结果

根据表 5 所确定的高应变拟合分析时合理的弹限值,采用 CAPWAP 软件进行人工调参拟合分析,结果见表 6。对比表 6 和表 3 可见,高应变拟合得到的总阻力、摩擦阻力和端阻力均很接近静载荷试验的内力测试结果。

表 6 高应变动力测试拟合结果表

Table 6 Matching results of high strain dynamic load testing

桩号	单桩极限承载力/kN			主要土参数				拟合贯入度 / mm	极限承载力对应桩顶沉降量/mm	
	总阻力	摩擦阻力	端阻力	Q_s^*	Q_T	SS	ST		D_y	D
7#	1 158	1 003	155	2.30	1.0	0.70	1.22	4.0	8.7	15.3
8#	3 047	2 454	593	4.88	3.0	0.69	0.26	2.9	31.1	32.8
9#	5 257	4 384	873	4.85	1.0	0.56	1.01	0.1	52.6	52.6

注:表中 Q_s^* 为桩侧弹限平均值。

4.5 $Q-s$ 曲线的动静结果对比分析

高应变拟合分析还可得出 $Q-s$ 曲线。将不同桩长类型的桩的 $Q-s$ 曲线的动静结果分别绘于图 7。由图可见,高应变拟合的 $Q-s$ 曲线在荷载达到极限之前其曲率变化不大,高应变拟合的桩顶沉降一般大于静载实测的桩顶沉降,只有当荷载接近极限值时,静载实测的 $Q-s$ 曲线急剧下弯,而高应变拟合的 $Q-s$ 曲线则较平缓,高应变的桩顶沉降小于静载实测的桩顶沉降,这一规律不管静载试验的 $Q-s$ 曲线是陡降型,还是缓变型的都同样存在。产生这一现象的原因主要有:(1)桩身材料弹性模量的假定

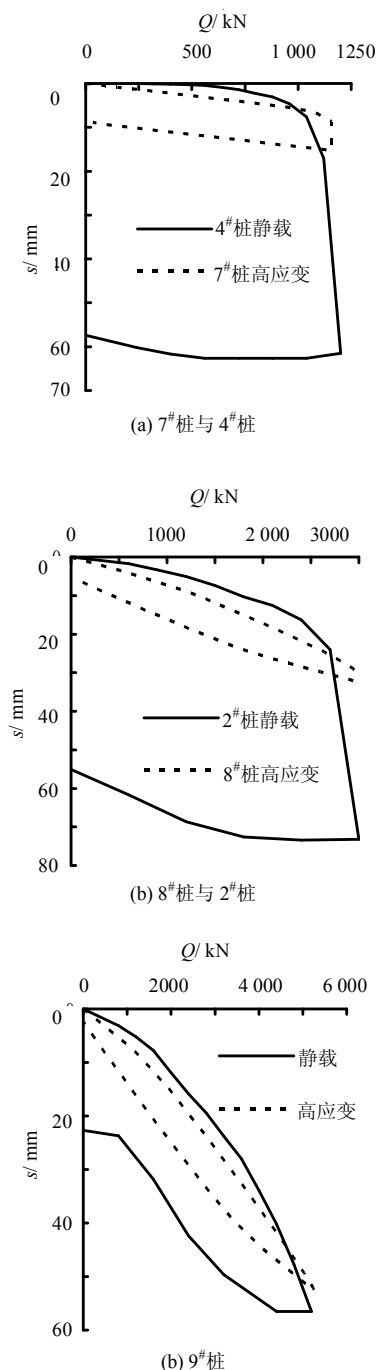


图7 $Q-s$ 曲线动静对比
Fig.7 $Q-s$ curves of dynamic load testing and static load testing

问题。为了分析的方便, 高应变动测分析计算时桩身采用弹性线性模型, 桩身材料的弹性模量 E 由其质量密度 ρ 和弹性波速 c 计算而得, 即 $E=\rho c^2$, E 为一常数, 与应力、应变水平无关。但静载试验的内力测试结果表明, 桩身横断面钢筋混凝土的轴向应力-应变关系为非线性的关系, 经回归分析后可用二次方程来表达这种关系, 方程形式如下: $\sigma=a_0+a_1\varepsilon+a_2\varepsilon^2$, 式中的 a_0 、 a_1 和 a_2 为回归方程系数。因此, 高应变动测试验模拟的 $Q-s$ 曲线与静载试验会产生一定的误差。(2) 桩侧土静阻力模型引

起的误差。目前的高应变动测分析软件都是将桩周土视为理想的弹塑性模型, 将土阻力的作用模拟成一弹塑性弹簧, 当该单元的桩位移 s 在未达到“弹限” s_u 以前, 土的静阻力 q 与 s 成正比; 在 s 超过 s_u 以后土的静阻力保持为极限土阻力 q_u , 而实际土体在受荷时表现出明显的非线性性状, 这也是高应变拟合的桩顶沉降与静载实测的桩顶沉降不一致的另一个原因。

由图7还可见, 当静载试验的 $Q-s$ 曲线为陡降型时, 高应变拟合的 $Q-s$ 曲线也出现了陡降段, 但陡降段的沉降量远小于静载实测的, 如7#桩高应变陡降段沉降量为6.6 mm, 但4#桩静载的为53.92 mm, 8#桩高应变陡降段沉降量为1.7 mm, 但2#桩静载的为49.24 mm。产生这种现象的原因主要是由于高应变测试时桩顶不可能激发出很大的贯入度。当静载试验的 $Q-s$ 曲线是缓变型时, 高应变拟合的 $Q-s$ 曲线也是缓变型的, 而且二者总沉降量的差值远没有陡降型的大。

5 结 论

(1) 当荷载不大时, 高应变拟合的桩顶沉降大于静载实测的桩顶沉降, 但当荷载接近极限值时, 高应变的桩顶沉降小于静载的桩顶沉降。当静载试验的 $Q-s$ 曲线是陡降型时, 高应变拟合的 $Q-s$ 曲线也出现了陡降段, 但陡降段的沉降量远小于静载实测值; 当静载试验的 $Q-s$ 曲线是缓变型时, 高应变拟合的 $Q-s$ 曲线也是缓变型, 而且二者总沉降量的差值远没有陡降型的大。高应变分析时桩身材料模型和桩侧土阻力模型的假定, 以及两种试验方法的激发水平不同均会对桩顶沉降的动静对比结果产生影响。

(2) 当超长 PHC 管桩桩身穿过一定深度的好土层、桩端进入全风化或更好的岩层时, 不管是静载试验还是高应变动力测试, 都很难使土阻力得到充分发挥, 实测到的土阻力主要来自摩阻力, 属于摩擦型桩, 但静载实测的和高应变拟合的 $Q-s$ 曲线都呈缓变型特征。这一特点与一般桩长的桩不同。

参 考 文 献

- [1] 陈凡, 徐天平, 陈久照, 等. 基桩质量检测技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [2] 王雪峰, 吴世明. 基桩动测技术[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [3] LIKINS G E, RAUSCHE F. Correlation of CAPWAP with static load tests [C]// Proceedings of the 7th.