

文章编号: 1000-7598-(2004)10-1622-05

PHC 管桩动力特性试验研究

石振明, 陈建峰, 祝龙根

(同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘 要: 系统地阐述了竖向/水平-回转耦合强迫振动和扭转自由振动等动力特性测试的原理和计算方法, 并对某新建火力发电厂 PHC 管桩进行了动力特性试验。试验分析计算所得的抗压刚度 K_z 、抗剪刚度 K_x 、抗弯刚度 K_ϕ 、抗扭刚度 K_ψ 和竖向振动阻尼比 ζ_z 、水平-回转耦合振动第 1 振型阻尼比 $\zeta_{x\phi 1}$ 、扭转振动阻尼比 ζ_ψ 离散性小, 有很好的规律性。试验是在桩头自由条件下进行的, 实际桩头嵌固在桩基承台中, 增加了桩头的嵌固条件和承台侧面填土抗力的影响, 故具体应用时可根据承台结构、承台侧面填土、承台底面与地基土接触等具体情况酌情予以提高。

关 键 词: 基础工程; PHC 管桩; 动力测试; 动刚度

中图分类号: TU473; O313

文献标识码: A

Test study on dynamic properties of PHC pile

SHI Zhen-ming, CHEN Jian-feng, ZHU Long-gen

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092, China)

Abstract: The parameters of foundation dynamic properties are the necessary data for analysis of dynamic response and stability of all constructions under dynamic loading. At present, prestressed high strength concrete piles (PHC) are applied broadly to civil engineering. The properties of PHC under static force have been studied much, but rarely under dynamic force. This paper expounds the principles and methods of dynamic properties tests as vertical forced vibration test, forced vibration coupled with translating and rocking test, twisting free vibration test, and three PHC piles of a thermal power plant to be built are measured by this dynamic properties test. The analyzed results show that compressing rigidity (K_z), shearing rigidity (K_x), bending rigidity (K_ϕ), twisting rigidity (K_ψ), and some damping coefficients (ζ_z , $\zeta_{x\phi 1}$, ζ_ψ) have little variety and good regularity. However, piles are usually constructed to form base slab, which increases lateral loading capacity of single pile, so the values of K_x , K_ϕ , K_ψ , $\zeta_{x\phi 1}$, ζ_ψ should be properly increased according to the type and lateral fill of base slab, contact property between the lower face of base slab and subsoil.

Key words: foundation engineering; PHC pile; pile dynamics; dynamic rigidity

1 前 言

地基动力特性参数是机器基础振动和隔振设计以及在动荷载作用下各类建筑物、构筑物的动力反应和地基动力稳定性分析必需的资料。目前, 地基动力特性测试已有 6 种成熟的方法, 但对于动力机器基础设计所需的地基动力参数, 必须采用激振法测试^[1]。激振法测试采用强迫振动和自由振动两种激振方式。

预应力高强度混凝土管桩 (PHC 桩) 因具有桩身强度高、抗弯、抗拉性能好、单桩承载力高、耐久性好、且造价较钢桩低等优点, 目前在建筑、桥

梁、港口等工程中开始较多的应用。有关 PHC 管桩在静力作用下的受力性能已做了一些研究^[2~6], 但在动荷载下的性能研究还做得很少。

本文结合某新建火力发电厂 PHC 管桩动力特性测试, 系统阐述了基桩动力特性测试原理和计算方法。为取得该工程试桩的动力特性参数, 需进行竖向强迫振动试验、水平-回转耦合强迫振动试验和扭转自由振动试验等动力特性测试。

2 基桩动力特性试验方法

2.1 竖向/水平-回转耦合强迫振动试验

强迫振动试验采用偏心块式激振器作振源, 为

了使激振器输出的扰力能有效地传到桩头上, 激振器与桩头之间必须有可靠的连接。拾振器安装在焊接于钢帽侧壁中心的刚性座上, 刚性座每边 1 只, 各刚性座距桩头顶面的距离均为 20 cm。竖向强迫振动试验, 对称地竖向安装 2 只拾振器, 以测定试桩的竖向振动位移。水平-回转耦合强迫振动试验, 水平、竖向各对称安装 2 只拾振器, 以测定试桩的水平振动位移和回转角值。

竖向强迫振动试验, 激振频率自 5 Hz 开始至 50 Hz 左右, 每升高 1 Hz, 记录测试数据 1 次。水平-回转耦合强迫振动试验, 激振频率自 3 Hz 开始至 25 Hz 左右, 每升高 1 Hz, 记录测试数据一次。竖向水平-回转耦合振动试验现场仪器、设备布置情况见图 1 和图 2。

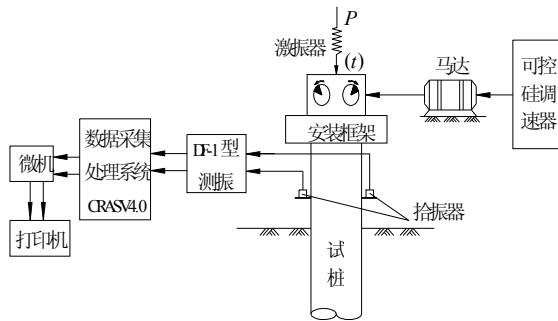


图 1 竖向强迫振动试验
Fig.1 Vertical forced vibration test

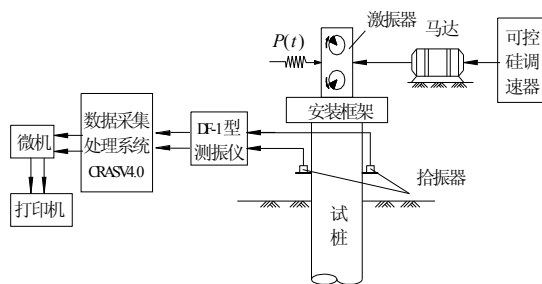


图 2 水平-回转耦合强迫振动试验
Fig.2 Forced vibration coupled with translating and rocking test

2.2 扭转自由振动试验

如图 3 所示, 扭转自由振动试验由传力杆、断裂器、钢丝绳、神仙葫芦等组成扭力矩施加系统。传力杆用焊接在桩头钢帽上的螺丝紧固在桩头上。断裂器试验前经严格标定, 拉断力 $F=10$ kN。试验时, 以神仙葫芦作为力源, 通过钢丝绳、断裂器对

传力杆施加拉力。传力杆上的拉力点距桩头中心的距离 L 为 1.0 m。当断裂器突然拉断时, 对桩头形成了一个突卸扭转力矩 M_ψ ($M_\psi=FL=10\times 1.0=10.0$ kN·m), 从而, 使桩产生扭转自由衰减振动。

在垂直于拉力 F 的钢帽 2 个侧壁中心线处各焊接一只刚性座, 刚性座面距桩头顶面 20 cm。2 只水平向拾振器牢固地对称安装在刚性座上, 以测定试桩扭转角 $\psi(t)$ 值。每根试桩扭转自由衰减振动做 2 次平行试验, 取其平均值作为实测分析计算数据。

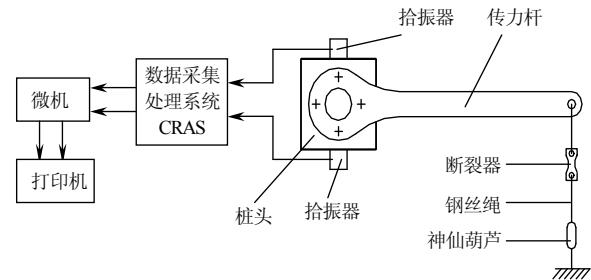


图 3 扭转自由振动试验
Fig.3 Twisting free vibration test

3 分析计算原理

3.1 计算图式

用质量-弹簧-阻尼器理论对其进行分析计算。竖向强迫振动、水平-回转耦合强迫振动、扭转自由振动的计算图式, 如图 4~6 所示。图中, $P(t)$ 为激振器的输出扰力 (kN); M_ψ 为扭转力矩 (kN·m); m 为竖向强迫振动参振质量, 它包括激振器、马达、安装框架和参振的桩、桩周土的质量 ($\text{kN}\cdot\text{s}^2\cdot\text{m}^{-1}$); $m_{x\phi}$ 为水平-回转耦合振动参振质量, 它包括的内容同 m ($\text{kN}\cdot\text{s}^2/\text{m}$); ζ_ϕ 为回转振动阻尼比 (无量纲); ζ_x 为水平振动阻尼比 (无量纲); ζ_ψ 为扭转振动阻尼比 (无量纲); K_z 为抗压强度。

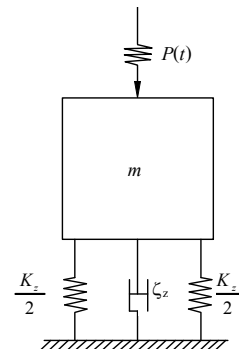


图 4 竖向强迫振动图
Fig.4 Physical model of vertical forced vibration

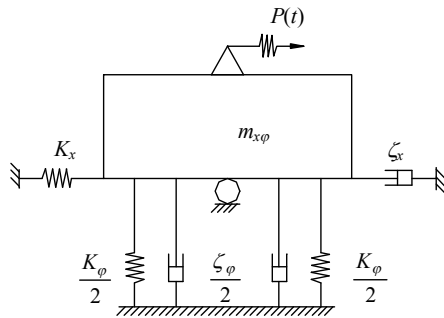


图 5 水平-回转耦合强迫振动图

Fig.5 Physical model of forced vibration coupled with translating and rocking

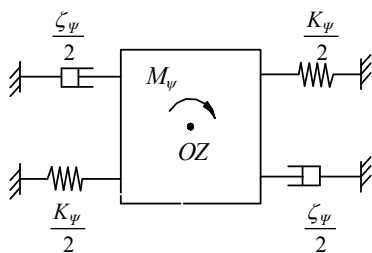


图 6 扭转自由振动图

Fig.6 Physical model of twisting free vibration

3.2 计算公式

3.2.1 竖向强迫振动

(1) 竖向强迫振动阻尼比

计算 ζ_z 时，在 A_z-f (竖向振幅-激振力周频率) 关系曲线 (图 7) 上，选取共振峰点 f_m 和 $0.85f_m$ 以下不少于 3 点的频率 f_i 及相应的振幅 A_i ，按下式计算

$$\zeta_z = \frac{\sum_{i=1}^n \zeta_{zi}}{n}; \quad \zeta_{zi} = \left[\frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\beta_i^2 - 1}{\alpha_i^4 - 2\alpha_i^2 + \beta_i^2}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (1)$$

$$\alpha_i = \frac{f_m}{f_i}; \quad \beta_i = \frac{A_m}{A_i}$$

式中 ζ_{zi} 为由第 i 点计算得到的竖向强迫振动阻尼比 (无量纲); f_m 为竖向强迫振动的共振频率 (Hz); A_m 为竖向强迫振动的共振振幅 (m); f_i 为在实测 A_z-f 关系曲线上选取的第 i 点频率 (Hz); A_i 为在实测 A_z-f 关系曲线上选取的第 i 点频率所对应的振幅 (m); f_1, f_2, f_3 所对应的振幅分别为 A_1, A_2, A_3 。

(2) 竖向强迫振动参振质量

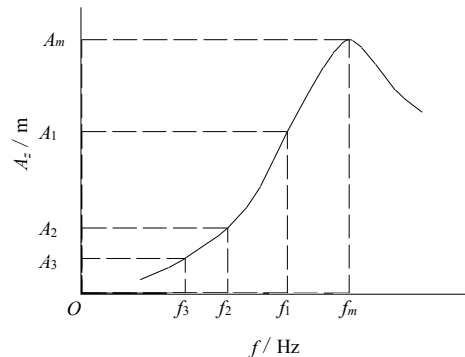
$$m_z = \frac{m_0 e_0}{A_m} \frac{1}{2\zeta_z \sqrt{1 - \zeta_z^2}} \quad (2)$$

式中 m_0 为激振器旋转部分质量 ($\text{kN} \cdot \text{s}^2/\text{m}$); e_0 为激振器旋转部分质量的偏心距 (m);

(3) 抗压刚度

$$K_z = m_z (2\pi f_{nz})^2; \quad f_{nz} = f_m \sqrt{1 - 2\zeta_z^2} \quad (3)$$

式中 f_{nz} 为竖向振动无阻尼固有频率 (Hz)。

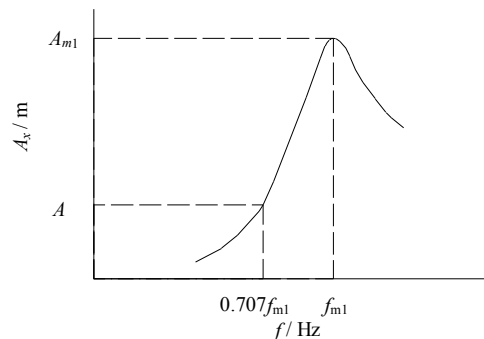
图 7 A_z-f 曲线示意图Fig.7 Curve of A_z-f

3.2.2 水平-回转耦合强迫振动

(1) 水平-回转耦合振动第 1 振型阻尼比

$$\zeta_{x\varphi 1} = \left[\frac{1}{2} \left(1 - (A/A_{m1})^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中 A_{m1} 为水平-回转耦合振动第 1 振型共振频率 f_{m1} 对应的水平共振幅 (m); 频率为 $0.707f_{m1}$ 对应的水平振幅 (m); A_{m1}, f_{m1} 的含义，参见图 8。

图 8 A_x-f 曲线示意图Fig.8 Curve of A_x-f

(2) 水平-回转耦合强迫振动参振质量

$$m_{x\varphi} = \frac{m_0 e_0 (\rho_1 + h_3) (\rho_1 + h_1)}{A_{m1}} \frac{1}{2\zeta_{x\varphi 1} \sqrt{1 - \zeta_{x\varphi 1}^2}} \frac{1}{i^2 + \rho_1^2} \quad (5)$$

式中， $\rho_1 = \frac{A_x}{\Phi_{m1}}$; $\Phi_{m1} = \frac{|A_{z\varphi 1}| + |A_{z\varphi 2}|}{l_1}$; $A_x^0 = A_{m1} - h_1 \Phi_{m1}$;

ρ_1 为第 1 振型的转动中心至地面以上桩、激振器、马达、安装框架合重心 O 的距离 (m); A_x^0 为合重心 O 处的水平振幅 (m); Φ_{m1} 为第 1 振型共振频率 f_{m1} 对应的回转角幅值 (rad); l_1 为 2 只竖向拾振器的间距 (m); h_1 为合重心 O 至拾振器刚性座之间的

距离 (m); h_3 为合重心 O 至拾振器水平扰力之间的距离 (m); $A_{z\phi 1}$ 为第 1 只竖向拾振器实测的水平-回转耦合振动第 1 振型共振频率 f_{m1} 对应的竖向共振幅 (m); $A_{z\phi 2}$ 为第 2 只竖向拾振器实测的水平-回转耦合振动第 1 振型共振频率 f_{m1} 对应的竖向共振幅 (m); i 为地面以上桩、激振器、马达、安装框架的合回转半径 (m)。 f_{m1} , Φ_{m1} 的含义, 参见图 9 回转角幅值-激振力周频率曲线。

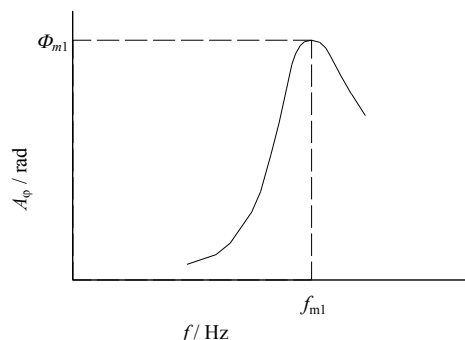


图 9 $A_\phi f$ 曲线示意图
Fig.9 Curve of $A_\phi f$

(3) 抗剪刚度

$$K_x = m_{x\phi} (2\pi f_{nx})^2; f_{nx} = \frac{f_{m1}}{(1 - h_2 / \rho_1)^{1/2}} \quad (6)$$

式中 $f_{m1} = f_{n1} \sqrt{1 - \zeta_{x\phi 1}^2}$; f_{nx} 为水平向无阻尼固有频率 (Hz)。

(4) 抗弯刚度

$$K_\phi = J(2\pi f_{n\phi})^2 - K_x h_2^2 \quad (7)$$

式中 $f_{n\phi} = \sqrt{\rho_1 \frac{h_2}{i^2} f_{nx}^2 + f_{n1}^2}$ J 为对通过合重心 O 并垂直于回转平面轴的惯性矩 ($\text{kN} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}$); h_2 为合重心至桩侧地面的距离 (m); $f_{n\phi}$ 为无阻尼回转固有频率 (Hz)。 h , h_1 , h_2 , h_3 的含义参见图 10。

3.2.3 扭转自由振动

(1) 抗扭刚度

$$K_\psi = \frac{M_\psi}{A_\psi} \quad (8)$$

式中 $A_\psi = \frac{A_{x1} + A_{x2}}{L_1}$ 。 M_ψ 为对桩头施加的突卸扭转力矩, 其值为 $10.0 \text{ kN} \cdot \text{m}$; A_ψ 为最大的扭转角幅值 (rad); A_{x1} , A_{x2} 分别为 2 只水平向拾振器实测所得的最大水平振动幅值 (m); L_1 为 2 只水平向拾振器之间的距离, $L_1 = 0.70 \text{ m}$ 。

(2) 扭转振动阻尼比

$$\zeta_\psi = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{A_1}{A_2} \quad (9)$$

式中 A_1 为 2 只水平向拾振器第 1 周平均振幅值 (m); A_2 为 2 只水平向拾振器第 2 周平均振幅值 (m)。

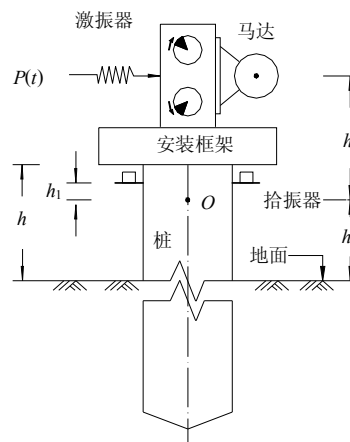


图 10 h , h_1 , h_2 , h_3 示意图
Fig.10 Signification of h , h_1 , h_2 , h_3

4 PHC 管桩动力特性试验数据分析

4.1 工程概况

某拟建火力发电厂机组为 $2 \times 600 \text{ MW}$, 位于长江三角洲冲积平原。场地地势平坦, 地基土由河口-滨海相的第四系全新统 Q_4 和晚更新统 Q_3 的松散沉积物构成。厂房试桩 T1, T2, T3 采用 PHC-AB600 型预应力高强混凝土管桩, 壁厚 110 mm , 桩间距为 4.0 m 。每根桩长 34.0 m , 分 3 节, 从上到下依次为 $10, 12, 12 \text{ m}$, 采用电焊法接桩。场地地面标高 3.52 m , 桩顶标高 2.22 m 。桩周及持力层土层自上而下依次为: ②-1 粉质粘土, 层厚 2.30 m ; ②淤泥质粉土夹粉砂, 层厚 5.10 m ; ③粉砂夹粉土, 层厚 4.20 m ; ④淤泥质粉质粘土夹粉砂, 层厚 4.00 m ; ⑥淤泥质粉质粘土夹粉砂, 层厚 9.50 m ; ⑦粉土夹粉砂, 层厚 2.60 m ; ⑧粉砂夹粉土, 层厚 24.90 m , 该层为桩基持力层。

4.2 动力特性实测数据及分析结果

对 T1, T2, T3 试桩进行了竖向/水平-回转耦合强迫振动和扭转自由振动试验。由竖向振动实测 $A_z f$ 曲线和水平-回转耦合强迫振动实测的 $A_x f$, $A_\phi f$ 曲线, 获得计算 K_z , K_x , K_ϕ 和 ζ_z , $\zeta_{x\phi 1}$ 所需的实测数据 (见表 1)。由扭转自由振动水平向拾振器实测 A_{x1} , A_{x2} 随时间 t 的变化曲线, 获得计算 K_ψ , ζ_ψ 所需的实测数据 (见表 2)。表 3 为 K_z , K_x , K_ϕ , K_ψ 和 ζ_z , $\zeta_{x\phi 1}$, ζ_ψ 的分析计算结果。

表 1 竖向/水平-回转耦合强迫振动试验实测数据
Table.1 Data measured by forced vibration test

振动方式	实测数据	试桩编号		
		T ₁	T ₂	T ₃
竖面振动	f_m / Hz	50.0	51.5	51.0
	$A_m / 10^{-6} \text{ m}$	32.0	29.0	31.0
	$A_1 / 10^{-6} \text{ m}$	17.9	17.6	17.4
	$A_2 / 10^{-6} \text{ m}$	7.0	6.6	7.6
	$A_3 / 10^{-6} \text{ m}$	2.9	2.7	2.7
	f_{m1} / Hz	33	35	34
	$A_{m1} / 10^{-6} \text{ m}$	450	435	445
	$A / 10^{-6} \text{ m}$	105	106	107
	$\Phi_{m1} / 10^{-6} \text{ rad}$	300	280	295
	h / m	0.600	0.620	0.600
水平-回转耦合振动	h_1 / m	-0.129	-0.102	-0.129
	h_2 / m	0.529	0.522	0.529
	h_3 / m	0.291	0.318	0.291
	$J / \text{kN} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}$	0.047	0.053	0.047
	i / m	0.318	0.323	0.318

表 2 扭转自由振动试验实测数据和分析计算

Table. 2 Data measured by twisting free vibration test and some analyzed coefficients

实测数据 及计算值	T ₁		T ₂		T ₃	
	B ₁	B ₂	C ₁	C ₂	D ₁	D ₂
L_1 / m	0.70		0.70		0.70	
$A_{x1} / 10^{-5} \text{ m}$	14.700	16.100	6.900	7.019	9.682	9.565
$A_{x2} / 10^{-5} \text{ m}$	10.362	10.402	14.184	13.858	13.139	13.530
$A_{\psi} / 10^{-5} \text{ rad}$	35.802	37.860	30.120	29.824	32.601	32.993
$K_{\psi} / 10^5$	0.279	0.264	0.332	0.335	0.307	0.303
$(K_{\psi})_{\text{平均}} / 10^5$	0.272		0.334		0.305	
$A_1 / 10^{-5} \text{ m}$	12.531	13.251	10.542	10.439	11.411	11.548
$A_2 / 10^{-5} \text{ m}$	6.426	6.974	5.271	5.092	5.763	5.892
ζ_{ψ}	0.106	0.102	0.110	0.114	0.109	0.107
$(\zeta_{\psi})_{\text{平均}}$	0.104		0.112		0.108	

备注: T₁, T₂, T₃分别为试桩编号; B₁, B₂, C₁, C₂, D₁, D₂分别为平行试验编号, K_{ψ} 和 K_{ψ} 的单位为 $\text{kN} \cdot \text{m} / \text{rad}$ 。

表 3 实测分析计算结果

Table. 3 Analyzed dynamic coefficients

试桩 编号	K_z	K_x	K_{ϕ}	K_{ψ}	ζ_z	$\zeta_{x\phi 1}$	ζ_{ψ}
	$/10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$		$/10^5 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$				
T1	1.225	0.1519	0.630	0.272	0.195	0.117	0.104
T2	1.361	0.1760	0.710	0.334	0.206	0.123	0.112
T3	1.272	0.1639	0.686	0.305	0.202	0.120	0.108

5 结 论

(1) 桩的动刚度、阻尼是动荷载(动力机器荷载、地震等)作用下,建(构)筑物上、下部共同作用动力分析的必要计算参数。本试验 3 根预应力管桩的动刚度试验,采用了竖向/水平-回转耦合强迫振动和扭转自由振动 3 种试验法,并对实测数

据进行了分析计算。试验及分析计算所得抗压刚度 K_z 、抗剪刚度 K_x 、抗弯刚度 K_{ϕ} 、抗扭刚度 K_{ψ} 和竖向振动阻尼比 ζ_z 、水平-回转耦合振动第 1 振型阻尼比 $\zeta_{x\phi 1}$ 、扭转振动阻尼比 ζ_{ψ} 、离散性小,有很好的规律性,数据可信。

(2) 本次试验是在桩头自由条件下进行的,但实际上桩头嵌固在桩基承台中,增加了桩头的嵌固条件和承台侧面填土抗力的影响, K_x , K_{ϕ} , K_{ψ} 和 $\zeta_{x\phi 1}$, ζ_{ψ} 均可有明显提高,在浙江嘉兴电厂桩动刚度试验中,曾就单桩桩头自由、双桩桩头有承台(高为 1.2 m)且侧面有回填土的情况进行了对比试验,后者的 K_x , K_{ϕ} , $\zeta_{x\phi 1}$ 比前者分别提高 2.7, 5.7, 1.4 倍之多,故在运用本试验结果时,可根据具体情况(如承台结构、承台侧面填土、承台底面与地基土接触情况)酌情予以提高。

参 考 文 献

- [1] GB/T 50269—97, 地基动力特性测试规范[S].
- [2] Paik K, Salgado R, Lee J W. Behavior of open-and Closed-ended piles driven into sands[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2003, 129(4): 296—309.
- [3] Lehane B M, Randolph M F. Evaluation of a minimum base resistance for driven pipe piles in siliceous sand[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2002, 128 (3): 198.—207.
- [4] YANG Q B, ZHANG S Q, HUANG S Y, et al. Effect of ground quartz sand on properties of high-strength concrete in the steam-autoclaved curing[J]. **Cement and Concrete Research**, 2000, 30 (12): 1 993—1 998.
- [5] 王戌平. 深厚软土中 PHC 长桩的时效性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 239—241.
WANG Xu-ping. Study on time effect of PHC open-ended pile in deep soft soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(2): 239—241.
- [6] 顾伟园. PHC 桩 30 m 长管节结构试验与计算[J]. 港工技术与管理, 1999, (6): 22—27.
GU Wei-yuan. Structural test and computation on 30 meters long PHC pipe pile[J]. **Harbor Engineering Technogy and Administration**, 1999, (6): 22—27.

