

精密仪器试桩的原理及应用

胡世雄, 李文平, 汪文龙

(金辉集团股份有限公司, 北京 100022)

摘要: 精密仪器试桩借助于钢筋应变计等精密原件可测出各土层在各级荷载下的平均侧摩阻力及桩端阻力, 为桩基优化设计提供现实可靠的设计参数, 同时可为桩土荷载传递机理的研究、设计计算方法的改进乃至规范局部修订积累宝贵的实践资料。但因缺乏对此类试桩方法系统而权威的介绍, 试桩过程无章可寻、无法可依, 直接影响了试桩的准确性与实际效果, 集中表现在成活率低与数据异常。而实际上, 精密仪器试桩是一个完整的系统工程, 从试桩设计与试桩方案、试桩施工与元件的安装到数据的采集与评估等各阶段都需要由有经验的专业人士来完成, 才能保证试桩目标的实现。

关键词: 精密仪器试桩; 振弦式钢筋应变计; 荷载箱; 零载读数; 残余荷载

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2011)S2-0422-06

作者简介: 胡世雄(1981-), 男, 山西人, 本科学历, 一级注册结构工程师, 从事结构设计方面研究工作。E-mail: 13811340325@139.com。

Principle and application of instrumented pile test

HU Shi-xiong, LI Wen-ping, WANG Wen-long

(Kamfei Group Co., Ltd., Beijing 100022, China)

Abstract: The instrumented piles test are possible to establish the unit skin friction and unit end bearing resistance of every soil layer at each load increment by means of the instrumentation parts such as the vibrating wire strain gauge so as to provide reliable parameters for pile design. The test results are also the precious research materials for the load transfer mechanism, design methods and code revision. However the testing accuracy and effect are not satisfied without the systematic and authority introduction, especially the low survival percentage and abnormal data. In fact, the instrumented pile tests are a systematic project, so instrumentation and taking the readings must be planned, executed, and evaluated by persons who have experience in all the phases.

Key words: instrumented pile test; vibrating wire strain gauge; load cell; zero-reading; residual load

1 概 述

精密仪器试桩是借助于钢筋应变计与荷载箱等比较精密的机械、电子原件, 通过系统而周密的操作过程, 从而准确获得桩基设计参数的一种新型试桩方法。其中振弦式钢筋应变计(下文简称钢筋计)是精密仪器试桩法中最为核心的部件, 广泛应用于岩体加固、支护结构、桩基监测、水工工程、隧道衬砌等多个工程建设领域。

钢筋计在桩基工程中的应用主要是在静载试验中实测各级荷载下对应截面的轴向应变值, 并通过桩体组合弹性模量计算得出各测量截面的轴力, 从而求出各土层平均侧摩阻力。通过此项检测, 可为桩基优化设计提供现实可靠的设计参数, 为桩土荷载传递机理的研究、设计计算方法的改进乃至规范局部修订积累

宝贵的实践资料。尤其对桩土荷载传递机理中的有效应力法(β 法)^[1-2]、残余荷载、临界深度等研究提供直接的试验数据, 具有多重的理论和实践意义。

2 钢筋计应用历史和现状

钢筋计在国外应用起步较早, 具有抗干扰能力强、受电参数影响小、零点漂移小、受温度影响小、性能稳定可靠、耐振动、寿命长等特点, 并且频率信号的输出便于采集、传输、存储和处理, 配合计算机系统可实现高精度自动测试, 因而在北美、欧洲等地得到迅速的发展和应用, 并逐步建立了一整套完整的测试系统。德国 MAIHAK、法国 TELEMAK、美国 SINCO

和 FOXBORO、英国 SCHLUBERGER 等都是国际知名的钢筋计制造商。新加坡等国则明确规定了每个工程必须进行包括钢筋计在内的精密仪器试桩并制定了具体明确的操作规程。

国内最早于 60 年代开始钢筋计类产品的研制开发和应用, 初期主要应用于地下连续墙内力的监测, 后来发展至桩基工程侧摩阻力的实测, 但却一直没有得到长足的进步和发展。究其原因, 主要是国内的钢筋计测试实例大多成活率偏低、数据异常, 加之技术支持、数据分析和后处理服务不到位, 以致在工程界形成了钢筋计系统费而不惠, 实用性差的印象, 影响了钢筋计在国内桩基工程中的推广应用。

天津某超高层项目, 117 层塔楼, 于 2009 年对总长 120 m 的后压浆钻孔灌注桩进行精密仪器试桩, 沿桩身钢筋计成对布置参见图 1。

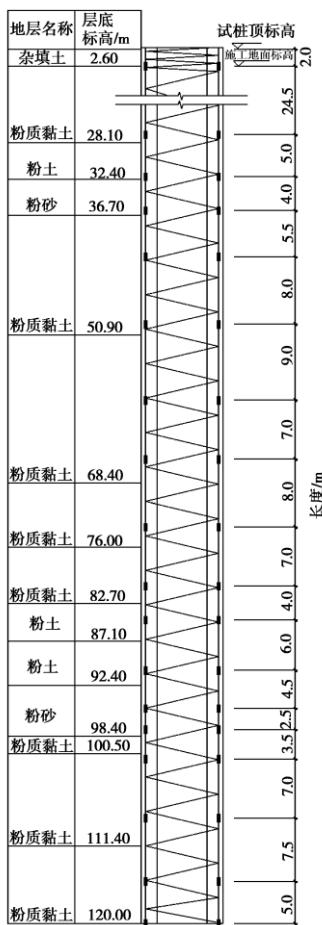


图 1 土层分布与钢筋计布置

Fig. 1 Soil layers and layout of VWSG

其中 #12 桩因施工与安装不当造成成活率过低, 在加载至 24000 kN 后几乎完全失去读数, #3 桩、#6 桩、#9 桩试桩直接得到的土层分段摩阻力及桩端承载力对比见图 2。

从图 2 来看, #3 桩、#6 桩、#9 桩对同一土层、同一深度的测试结果总体上存在较大差异, 并出现了部分异常数据, 以致试桩报告最终无法得出各土层侧摩阻力的真实数值, 未能实现预期目标。

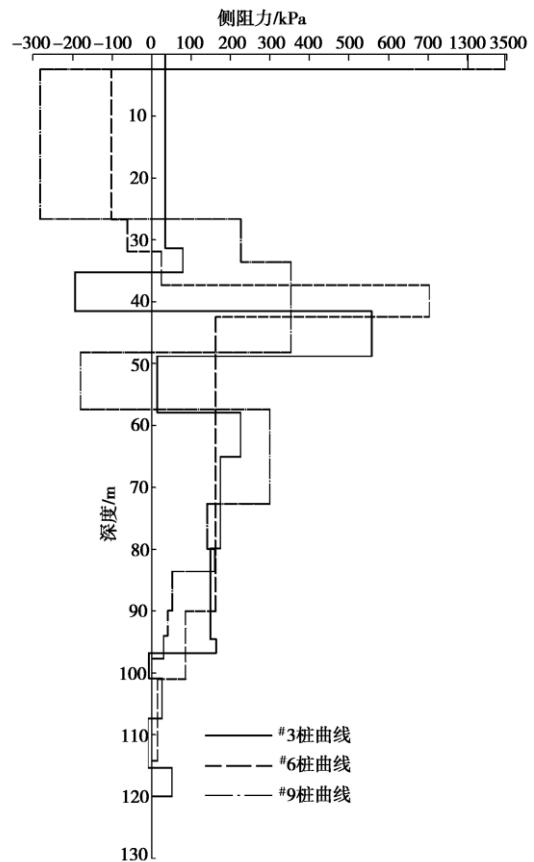


图 2 #3、#6、#9 桩柱侧最大摩阻力 - 深度曲线

Fig. 2 Measured curves of resistance-depth of piles #3, #6 and #9

结合试桩报告给出的结论和现场调查, 造成失败的直接原因可能有如下几点: ①初始频率标定不当; ②焊接时野蛮施工, 未采取防止焊接热量改变钢弦初始频率的措施, 之后也未进行重新标定; ③桩头制作时剔除浮浆等工序造成导线损伤; ④后压浆操作不当, 对钢筋计工作状态产生不良影响; ⑤读数受人为因素影响; ⑥桩体质量不均, 内部实际应力状态不均等。

上述问题并非是本次试验的特例, 在国内其他精密仪器试桩作业中具有一定的普遍性。与国外普遍的成功应用相对照, 关键之处在于对精密仪器试桩的深入认识和系统运用。

钢筋计检测系统是一个由产品、安装、记录、处理、服务等过程组成的有机系统, 需要制造商、设计单位、施工单位和检测单位紧密配合才能圆满完成, 实现其技术优势并达到多重目标和效果。从国外应用的成熟经验来看, 也只有将之从一个工业产品的简单使用提高到一个检测工程的高度, 才能逐步推广钢筋计检测系统在桩基工程中的使用, 通过不断总结积累

经验来推进诸多相关的重要理论的研究并指导工程实践。

3 钢筋计的基本特性和构造

钢筋计由受力弹性形变外壳(或膜片)、钢弦、紧固夹头、激振和接收线圈等组成, 传感元件是钢弦, 钢弦自振频率和张紧力大小有关, 在振弦几何尺寸确定后, 振弦振动频率的变化量可以表征受力的大小。钢弦在钢筋发生拉压应变时激发脉冲, 由同心安装的振弦传感器监测, 测得的应变读数可以转换成轴向荷载或者转换成混凝土桩体内的应变。基本关系式为

$$f_0 = \frac{1}{2L} \times \sqrt{\frac{\sigma_0}{\rho}} \quad , \quad (1)$$

式中, f_0 为初始频率, L 为钢弦有效长度, σ_0 为钢弦上初始应力, ρ 为钢弦材料密度。

振弦式钢筋应变计具有如下几个重要的机械特性: ①非线性, 数据需经线性回归处理, 以保证较高的测试精度; ②灵敏度与钢弦长度和抗弯刚度有关, 应根据需要正确选择产品; ③温度影响, 温度变化不可避免地会对金属材料产生影响, 需要选择恰当工作温度范围的产品并在施工中尽量减少温差变化; ④稳定性, 稳定性受材料残余应力和蠕变的影响, 但在材料选择和工艺水平恰当的情况下有较高的保障率; ⑤滞后性, 机械机构稳定, 只适用于静态测试和不大于 10 Hz 的准动态测试。

经国内外实际项目验证, 在正确安装、使用和施工的前提下, 是一种性能稳定、抗干扰能力强、经久耐用、防水性能好、可用于长期观测的计测装置。钢筋计构造见图 3。

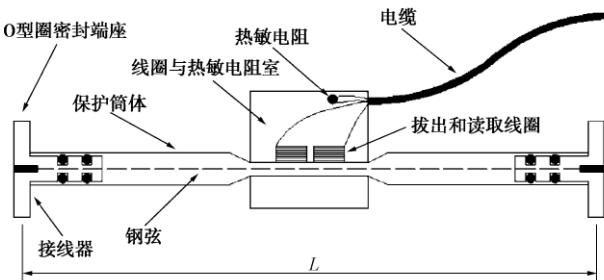


图 3 钢筋计详图

Fig. 3 Drawing of VWSG

4 钢筋计的工作原理

钢筋计装载在伴筋(Sister Bar)上, 伴筋采用工程钢筋并与主筋相连, 通过焊接保证钢筋计与被测钢筋具备相同的力学性能, 这点是钢筋计工作非常重要

的前提。钢筋计受力时, 内部的钢弦振动频率与其张紧的程度在一定范围内成正比, 通过读取某种状态下的振动频率, 就可以得出具体位置的钢筋计受力情况, 即:

$$F_g = A(f_i - f_0) + B \quad . \quad (2)$$

式中 F_g 为钢筋计受力; f_i 为电脉冲激发下输出频率实测值; f_0 为加载前一个阶段钢筋计初始输出频率值; A 为标定系数; B 为计算修正值。

标定系数 A 和计算修正值 B 由制造商给定或在测试前进行标定, 通过对钢筋计施加一定增量的力, 测定不同大小力对应的输出频率并对之进行回归分析从而对 A 、 B 值进行标定。

桩体主筋上钢筋计位置设计的基本原则包括两个方面: 一是平面设计, 一般而言需要至少一对钢筋计, 把它们布置在柱截面的两端并保证它们对中性轴等距, 单个的钢筋计无法剔除桩身弯曲变形的影响(如果要获得更好的测试效果, 可以对称布置两对钢筋计); 二是沿柱身的竖向设计, 一般情况下应在土层分界处设置测量截面和安装钢筋计, 同时保证一定的间距, 避免因某土层较厚出现测量距离过大影响平均精度水平。

在加载之前考虑扣除安装、混凝土凝固等因素后进行初始读数, 确定基准频率 f_0 , 随着载荷试验逐级加载, 对应读取一系列的频率输出值 f_i , 得出钢筋受力值 F_{gi} , 则可得出相应试验荷载阶段 σ_i , 即

$$\sigma_i = \Delta F_{gi} / A_g \quad , \quad (3)$$

式中, σ_i 为钢筋计应力, A_g 为钢筋横截面积。又有

$$\varepsilon_i = \sigma_i / E_{gs} \quad , \quad (4)$$

式中, ε_i 为钢筋计应变, E_{gs} 为钢筋计弹性模量。

根据变形协调条件可知, 在材料弹性工作范围内, 有混凝土和钢筋足够握裹力保证的前提下, 钢筋计(钢筋)和桩身混凝土共同受力, 在同一截面发生相同应变, 有

$$\varepsilon_i = \varepsilon_c \quad , \quad (5)$$

式中, ε_i 为钢筋计应变, ε_c 为混凝土应变。

由 $Q = \sigma A$ 可知

$$Q = \varepsilon E_{comb} A_z \quad , \quad (6)$$

式中, A_z 为柱体有效截面积 ($A_z = A_s + A_c$), E_{comb} 为柱体组合模量,

$$E_{comb} = \frac{E_s A_s + E_c A_c}{A_s + A_c} \quad . \quad (7)$$

由上述公式即可求得每对钢筋计位置柱体的轴力情况, $\Delta F = Q_{i+1} - Q_i$, ΔF 为每两对钢筋计之间柱体的侧摩阻力, 某桩段侧单位摩阻力 q_{si} (侧摩阻力系数) 可由下式求出:

$$q_{si} = \frac{\Delta F}{\pi D(H_i - H_{i-1})} \quad . \quad (8)$$

而一定长度的桩侧摩阻力可由各钢筋计间桩段侧摩阻力求和得出:

$$F_l = \sum F_i \quad . \quad (9)$$

由此得出的桩侧摩阻力是特定桩基在特定场地条件下工程特性的真实体现^[3-4]。

5 应用系统

钢筋计是一项工业产品, 精密仪器试桩却是一个完整的系统工程, 包括测试目标、测试系统、测试方式和工作原理、测量精度、施工安装、数据采集、人员素质、数据处理和评估等多方面的内容和要求。

5.1 目标系统

首先从观念上进行转变, 把钢筋计的运用从桩基检测的一个简单元件的使用变成一项值得关注的、具有重要价值的、需要专业操作的桩基检测分项工程。这个分项工程的意义不仅在于提供真实的岩土工程特性, 同时也用来检验设计假设和方法是否合理、检验施工过程是否遵守规范、施工质量是否达到设计要求; 还因为具备长期观测特性, 因而在重大工程或需要进行桩基性能长期监测的项目中具有独特的意义, 尤其适用于土层力学性质随水位等客观条件变化可能发生较大变化的场地的桩基性能检测; 最后, 作为对新的桩基类型或施工工艺可行性的检验, 钢筋计检测是提供桩体真实工作性能和长期数据支持的较好选择。

5.2 硬件组成

钢筋计测试系统元件组成包括振弦式钢弦、变形测试计、荷载传感器、复接器、数据采集器等, 完整的测试系统应该包括钢筋计在桩身的平面和纵向布置、钢筋计与桩体钢筋的连接(图4)、信号线缆的保护接长(图5)以及与读数装置的连接等。

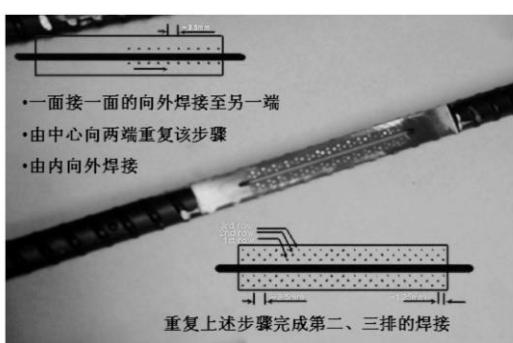


图4 焊接过程

Fig. 4 Spot welding procedure

5.3 测量精度

测量精度的选取首先需要概念性判断实测值和真

实值的吻合程度, 以大体确定适用于具体项目的测量精度; 其次应注意分清楚精度和灵敏度的差异; 同时还需要考虑钢筋计工作温度变化、安装方式不同和现场条件改变对精确性带来的影响, 以便正确评估测量精度的设定是否恰当地符合特定项目的需求, 这部分工作应由检测单位和制造商的专业工程师合作完成。



图5 应变计和感应器连接及信号电缆接长(包裹环氧树脂)

Fig. 5 Connection of VW strain gauge and C/w sensor and epoxy attached to extension signal cable

5.4 施工安装

正确施工是本系统正常工作的前提和保障, 应根据制造商专业技术人员的指导和建议进行。针对预制桩, 应注意搬运连接钢筋计时不应对原钢筋笼造成脱焊等不良影响, 尽量减少连接钢筋计后的焊接工作; 浇筑前导线在桩体尤其是桩头位置的保护; 注意养护温度是否超出钢筋计的正常工作温度范围; 防止线头被水泥浆黏连等。对于灌注桩, 则应注意防止焊接中损伤钢筋计及导线; 防止过度的温度变化(可采用焊接时不断冲淋钢筋等手段); 防止钢筋笼就位过程中损坏导线; 防止后压浆过程对钢筋计及导线造成影响; 防止凿除桩头时对导线的破坏等。钢筋计是一种较精密的仪器, 施工现场可能对其产生诸多不利影响, 整个安装、施工过程应由专业人员或在专业人员指导下完成。

5.5 数据采集

数据采集是钢筋计工作系统最核心的部分。首要的一个概念是零载读数, 因为钢筋计测量的是相对于无加载状态的应变变化, 因此真正的零载状态是什么就是一个很重要的概念。一般情况下认为在加载测试开始之前的读数即可作为零载读数, 但实际上在加载开始之前, 桩体上往往就已经作用了荷载甚至已经产生了较大的轴力, 另外局部应变的发展也并非总是与桩身平均压应变存在直接联系, 有时诸如温度变化、钢筋的滑移收缩和钢筋计损伤都可能出现与之无关的应变, 图6为Hayes在2003年实测的混凝土龄期与内部应变的关系曲线。

Fellenius 在 2003 年提出了在试桩作业全过程真实记录每一次可能使钢筋计受到影响的读数, 由此提出了残余轴力的概念^[5] (见图 7), 认为应对钢筋计测得的桩身轴力进行修正。

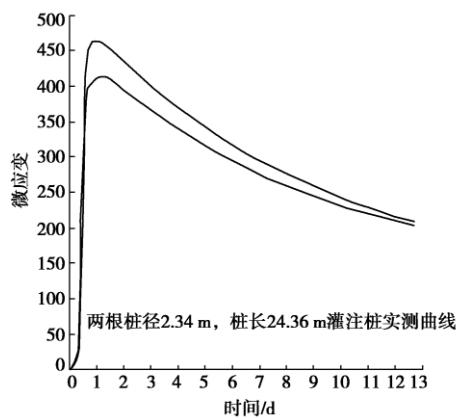


图 6 混凝土龄期与内部应变关系图

Fig. 6 Internal strain history during curing

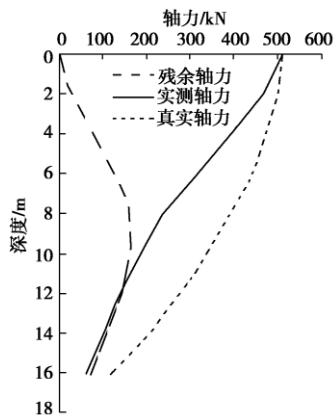


图 7 某预制桩实测轴力图

Fig. 7 Measured axial force of a precast concrete pile

除了钢筋计出厂的读数 (校准读数) 外, 尚应记录钢筋计进入桩孔前后、进入桩孔适应地面温度时、浇筑混凝土前后、混凝土养护完成时等可能对钢筋计读数产生影响的关键点读数, 与传统意义上认为的加载开始前的“零载读数”共同组成数据采集的前期部分。

采集数据同时要注意, 卸载不均匀、荷载持续不均匀和荷载增量不均匀均会对数据产生影响, 应尽量保持持续的加载、恒定的持续时间和均匀的卸载, 这样同时还可以避免桩侧土体固结产生的影响, 如果出现无法保持的情况则应及时记录过程, 以便对数据进行后处理和分析修正。

5.6 人员素质

数据采集人同样是可能产生变数的因素之一。数据采集的工作人员应该由受过专业训练和培训的技术人员担任, 在数据收集过程中可以对数据异常、监测设备故障和仪器损坏作出准确的判断和及时的反应,

以便尽早采取措施; 数据采集人还应受完整的数据采集工作流程约束, 制定完整的监测进度计划和监测时间记录表; 鉴于监测工作的连续性, 数据采集工作应尽可能连续作业。在有条件的情况下可由专业服务商提供数据采集服务, 采用自动和远程数据采集, 可最大程度上减少人为因素的影响。

5.7 评估和后处理

正确有效的数据处理和评估是获得有价值试验结果的保障。数据处理人应能够对每组数据的有效性进行判断, 剔除异常数据并分析异常原因; 采用专业软件对数据进行调整处理; 可能的情况下还要根据每个加载阶段应力水平来评估当时的混凝土模量变化对数据的影响。

数据评估和后处理是最终获得可用的工程数据的步骤, 包括对数据平均值和最大值的数学处理, 绘制桩身轴力分布图、弹性压应变、侧摩阻力分布图、 $Q-C$ 曲线和 $T-C$ 曲线等, 至此完成一个精密仪器试桩的全过程。

6 结论和建议

钢筋计是一项工业产品, 精密仪器试桩却是一项复杂的系统工程, 并具有多重目标价值。应用钢筋计测得的桩身轴力分布可以推算出土层侧摩阻力分布, 结合 β 法应用时可作为实测的 β 值, 对于地面试桩、套管试桩与实际应用的桩基竖向承载力 (坑底试桩) 确定具有积极的现实意义^[2]; 也可为桩土荷载传递机理的研究积累宝贵的试验数据; 从工程实践角度看, 确定真实的土层侧摩阻力分布对于试桩后调整桩基设计提供了最真实可靠的数据支持, 为优化桩基设计带来更多的可能性。

结合天津某项目检测失败的实例, 认为精密仪器试桩在国内未能得到较好推广的根本原因在于观念和认识的不足, 所有的现象归结到底都是人的因素。正视和借鉴国外的成功经验, 进行系统化的把握和应用, 是摆脱目前困境和实现其诸多价值的正确途径。

精密仪器试桩应该由一个简单元件使用变成一项值得关注的、具有重要价值的、需要专业操作的桩基检测分项工程, 从测试目标、测试系统、测试方式、工作原理、测量精度、施工安装、数据采集、人员素质、数据处理和评估等进行全流程专业化实施, 保证实测意义和目标的实现。

混凝土弹性模量与其所处的弹性应力水平存在一定函数关系, 将对计算理论产生影响; 残余轴力理论也对侧摩阻力的分布存在修正的可能性。鉴于国内外对此尚未形成统一的权威解释, 今后的试验研究中应

对此两项内容给予重点关注。

参考文献:

- [1] 史佩栋, 顾晓鲁. 桩基工程手册 (桩和桩基础手册) [M]. 北京: 人民交通出版社, 2008: 70 - 76. (SHI Pei-dong, GU Xiao-lu. Pile and pile foundation handbook[M]. Beijing: China Communications Press, 2008: 70 - 76. (in Chinese))
- [2] 李文平. 基坑开挖对桩基承载力的影响及 β 法的工程应用 [J]. 岩土工程学报, 2010, 8(增刊 2): 1 - 4. (LI Wen-ping. Effect of excavation on pile capacity and engineering application of β -method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 8(S2): 1 - 4. (in Chinese))
- [3] 李连虎, 刘京平, 孙进忠, 等. 用载荷试验及钢筋计测试联合确定一定深度上的桩基承载力 [J]. 现代地质, 2003, 17(1): 3 - 4. (LI lian-hu, LIU jing-ping, SUN jin-zhong, et al. Determining the bearing capacity of the pile below a certain depth by the method combining loading test and steel bar gauge measurement[J]. Geoscience, 2003, 17(1): 3 - 4. (in Chinese))
- [4] FELLENIUS Bengt H. Basics of foundation design[M]. Richmond, British Columbia, Bitech Publishers Ltd, 1999: 98 - 100.
- [5] CP 4—2003 Code of practice for foundations[S].

(本文责编 明经平)