

桩基工程 质量的诊断技术

——方法、原理及应用实例

»» 李德庆 李澄宇 李澄海◎编著

中国建筑工业出版社

桩基工程质量的诊断技术

——方法、原理及应用实例

李德庆 李澄宇 李澄海 编著

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

桩基工程质量的诊断技术——方法、原理及应用实例/李德庆,
李澄宇,李澄海编著. —北京:中国建筑工业出版社, 2009

ISBN 978-7-112-10912-8

I. 桩… II. ①李…②李…③李… III. 桩基础—工程质量—
检测 IV. TU473.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 055305 号

本书全面介绍了世界各国在 20 世纪 80 年代以来桩基工程检测技术的成就和进展,重点总结了我国的具体实践经验。在此基础上,作者提出只要合理地综合运用目前已经趋于成熟的多种检测技术,就可以大大提高对桩基工程质量的判断能力,以更低成本和代价,建立更加有效的桩基工程的质量诊断体系。

本书第 2 章为读者提供了必要的理论知识,内容浅显易懂;在其余各章中,详细说明了各种检测方法的原理和应用要领,并提供了世界各国大量的应用实例。此外,作者还对目前我国桩基质量检测中存在的若干问题,进行了较为深入的探讨。

本书体系完整,内容充实严谨,行文深入浅出,实用性强。可供从事桩基工程设计、施工、检测、监理人员以及科技院所、高等学校相关研究人员学习和参考。

* * *

责任编辑:刘瑞霞

责任设计:董建平

责任校对:兰曼利

桩基工程质量的诊断技术

——方法、原理及应用实例

李德庆 李澄宇 李澄海 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京天成排版公司制版

北京富生印刷厂印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:31½ 字数:786 千字

2009 年 8 月第一版 2009 年 8 月第一次印刷

印数:1—2500 册 定价:68.00 元

ISBN 978-7-112-10912-8

(18160)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

本书的中心议题可以用以下一段话来加以概括：长期以来，静载荷试验一直是人们确定桩基工程质量的主要而几乎是唯一的手段。由于这种试验方法十分费时费力，试桩数量不得不减少到最大的限度；通过静载试验能够获取的桩的性状，实际也仅限于沉降与荷载的关系曲线以及由此推定的单桩极限承载力。应该说，借助于静载试验，人们只能极其粗略地掌控桩基的设计质量和施工质量。随着各种技术经济指标更好而施工工艺更加复杂的新的桩型的出现，单一的静载试验法日益显得无法满足桩基工程质量诊断的需要。在 20 世纪后期的二三十年间，随着各种近代新技术的涌现和发展，波动技术被大量用来检测桩基工程的质量。现在，经过专业训练的工程师已经可以运用多种基于波动技术的新检测方法查明两方面重要信息——桩身的完整性(pile integrity)和桩周土体对桩的竖向承载能力。有了这些新技术的帮助，我们不仅能够深入地揭示试桩的多方面的实际性状，确切地诊断出试桩中存在的问题，而且还能极大地扩大检测面，从而对整个桩基工程的质量做出更加可靠而准确的评价。应该说，随着新技术的出现，桩基工程的质量诊断技术已经发展成为一门内容丰富而自成体系的应用学科。全面审视我们目前已经拥有的各种手段并全面合理地加以利用，显然是一件顺理成章而具有重大现实意义的工作。

必须承认，把波动技术用于桩基质量检测是比较困难和复杂的；我国起起落落探索了三十来年，虽然已经在国际上跻身于技术比较先进的行列之中，却至今仍存在较多的问题而引发各种不同的看法。对于用波动方法检测桩的承载力，有人始终不信；有人曾经寄予厚望，后来却又发生怀疑；也有人过分夸大新技术的功能而认为可以完全取代原有的传统技术。

本书的核心部分是第 3 章到第 8 章，其中第 3 章～第 7 章分别说明传统的和新兴的各种检测方法的原理、具体做法和应用实例；随后的第 8 章探讨了如何综合使用新老技术，从而以最佳的技术经济效益完成对桩基工程的质量诊断。考虑到建筑行业的技术人员对于波动技术比较陌生，本书的第 2 章提供了必要的基础知识；熟知有关知识的人员可以不读。最后的第 9 章则是对当前存在的若干问题的探讨，希望有助于进一步推动相关技术的发展。

针对每个具体问题，本书从文献中引用了大量的资料，以便尽可能把世界各国各种有价值的资料、看法和建议介绍给读者。但愿附在本书后面的参考文献目录能够间接表达我们对所有这些为这门技术的发展作出重要贡献的学者和工程技术人员的感谢。

为了适应我国当前广大从业人员的实际情况，我们力求本书尽可能以容易理解的方法来说明问题，使之成为一本浅显易读而又不失严谨的自修参考读物；但愿本书能够对广大的从业者和关心者有所帮助。

在本书的末尾，除了参考文献目录外，还集中说明了书中所用的符号和术语。由于波动技术涉及多个学科，国外的软硬件又在我国得到相当广泛的应用，实际使用的符号和术

语极为混乱，与我国的相关规范也不够一致。鉴于桩基工程的质量诊断技术已经成为一门自成体系的学科，我们在本书中力求在一个统一的框架内形成比较合理的符号系列，避免同一符号多重含义，并尽可能与我国规范和相关学科取得一致。为此，在引用各国的文献时，我们除了尽可能注明其具体出处外，同时也不得不把其中的符号按本书的规定作必要的改动。对于需要说明的本行业专用术语，行文中多数以括号标明其英译，读者还可以在附录中按照其在书中出现的先后顺序查到相应的定义或解释。

本书的作者都是北京平岱公司(PDC)的主要技术人员。书的总纲是在集体的多年共事和日常讨论的基础上形成的；具体的内容则按各自的分管业务和特长分工编写：李澄宇主管工程检测和公司客户的技术培训及咨询，在技术开发方面侧重于计算方法；李澄海负责软硬件的开发、维护和相关的用户咨询；李德庆侧重于国内外经验的收集和总结，并承担了本书行文和符号的统一。

感谢美国 PDI 公司的 Goble G. , Rausche F. 和 Likins G. 几位专家提供的部分资料 and 直接间接的咨询服务。感谢 PDC 公司的广大用户为本书提供了大量的素材，用户日积月累的提问等于为书中许多章节命题，而公司和用户的技术交流则大大加深了这些课题的内容；应该说，用户的鼓励是我们下决心从事这一力不胜任的编纂任务的关键性因素。PDC 公司的其他成员参与了专门的试验，并且在资料的搜集、插图的绘制、内容的校对以及成书所必需的物资和后勤方面完成了大量的工作。

欢迎读者对本书提出批评意见和改进建议。

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 桩基工程质量诊断的目的和对象	1
1.2 成桩检测技术的发展概况	2
1.3 我国保障桩基工程质量的基本做法	7
1.4 成桩检测的内容	10
1.5 提高桩基工程质量诊断水平对桩基工程的重大作用	12
第 2 章 关于波动的基础知识	16
2.1 波动的概念和特性	16
2.1.1 波动的基本属性	16
2.1.2 波动的基本参量	17
2.1.3 冲击应力波的基本属性	18
2.1.4 波动方程与波的传播速度	20
2.1.5 弹性杆件的基本动力特性	22
2.2 一维波动方程的行波解	25
2.2.1 一维波动方程的行波解及其适用条件	25
2.2.2 应力波的叠加	27
2.2.3 应力波在杆件中阻抗突变截面处的反射和透射	27
2.2.4 应力波在不同介质之间传播的耦合问题	30
2.2.5 应力波在弹性杆件中传播的能量损耗、波形畸变和波速变化	31
2.2.6 沿轴向作用于杆件侧面的动态外力的影响	37
2.3 一维波动方程的谐波解	39
2.4 利用冲击激发应力波	44
2.4.1 激发应力波的基本方法	44
2.4.2 有限长弹性杆件的共轴碰撞	48
2.4.3 刚性锤体通过线性垫层对弹性杆件的锤击作用	52
2.4.4 冲击应力波的频率特性	55
2.4.5 集中脉冲力在弹性杆件顶面引发的波动	58
2.4.6 一维杆件中的局部非一维问题	62
2.5 应力波的检测技术	65
2.5.1 惯性系统在测定运动的传感器中的作用	65
2.5.2 传感器和测点间的振动传递问题	71
2.5.3 桩基检测中常用的传感器	73
2.5.4 使用桩基检测仪器的基础知识	78
2.5.5 应力波检测中的主要误差来源	82
第 3 章 检测桩基质量的传统方法——静载试验	88

3.1	我国对桩的静载试验的常规做法	88
3.2	静载下土阻力的变化规律和发展机理	89
3.3	静载下桩的破坏模式及其 $Q-s$ 曲线特征	92
3.4	静载试验确定单桩竖向极限承载力的方法	94
3.5	静载试验的优点和应用局限性	101
第4章	新方法之一——透射波法	104
4.1	透射波法的原理及其基本检测方式	105
4.2	激振与检测系统	108
4.3	目前采用的标准检测方法	110
4.4	目前采用的常规分析方法	117
4.5	根据透射波法分析结果评定桩的完整性	124
4.6	非常规的检测与分析方法	127
4.7	部分具有代表性的应用实例	129
4.8	透射波法的检测精度和可靠性	133
4.9	透射波法的优缺点和应用局限性	136
4.10	发展前景	138
第5章	新方法之二——低应变反射波法	142
5.1	低应变反射波法的基本原理和常规做法	144
5.2	低应变反射波法的数据采集技术	151
5.3	实测信号的现场快速处理技术	159
5.4	数据记录在时域中的解读和分析技术	163
5.5	数据记录在频域中的解读和分析技术	176
5.6	桩身完整性的评定和检测结论	184
5.7	部分具有代表性的应用实例	185
5.8	低应变反射波法的检测精度和可靠性	199
5.9	低应变反射波法的优缺点和应用局限性	204
第6章	新方法之三——采用 CASE 法分析数据的高应变动力试验法	207
6.1	动力作用下的桩周土阻力	209
6.1.1	动力作用下桩周土体的基本性状	209
6.1.2	冲击荷载作用下的动态土阻力与静载试验时的静阻力的异同	210
6.1.3	土的静阻力在桩身受到冲击作用后的变化机理	213
6.2	高应变动力试验法的常规做法	218
6.2.1	高应变动力试验法的基本检测方式	218
6.2.2	在桩顶实施锤击的常规做法	219
6.2.3	检测的常规做法	221
6.3	高应变动力试验的数据采集技术	226
6.3.1	选择最合用的锤击设备	226
6.3.2	确保实际施加的锤击作用满足检测需要	233
6.3.3	确保现场采集的数据记录符合质量要求	240
6.3.4	现场检查数据记录质量的办法	250

6.3.5	试桩基本情况的快速判断	261
6.3.6	高应变动力试验法数据采集的安全措施	267
6.4	分析高应变动力试验数据的 CASE 法	268
6.4.1	CASE 法的基本假定	268
6.4.2	CASE 法中计算动态总阻力的 CASE-Goble 公式	271
6.4.3	确定桩周土体极限静阻力的基本算法	274
6.4.4	确定桩周土体极限静阻力的各种修正算法	278
6.4.5	用 β 法估计桩身缺陷的严重程度	281
6.4.6	关于 CASE 阻尼系数 J_c 的取值方法和物理意义的探讨	284
6.4.7	CASE 法的应用可靠性和适用范围	292
第 7 章	新方法之四——采用拟合法分析数据的高应变动力试验法	297
7.1	实测曲线拟合法的的基本分析流程	301
7.1.1	目前采用的桩土数学模型	302
7.1.2	实测信号的预处理	309
7.1.3	拟合分析流程的选择和参数的输入	314
7.1.4	拟合质量的评定和最佳拟合结果的抉择	315
7.1.5	指导拟合分析进程的专家系统	316
7.1.6	静载试验的 $Q-s$ 曲线的模拟计算	316
7.1.7	分析结果的存储、调用、显示和打印检测报告的部分格式内容	318
7.2	关于拟合参数的合理取值范围及其变化对计算曲线的影响	319
7.3	用高应变动力试验法确定单桩承载力的可靠性	327
7.4	高应变动力试验法的成果评定	333
7.4.1	根据拟合分析结果评定单桩承载力	333
7.4.2	根据拟合分析结果评定桩身完整性	336
7.5	高应变动力试验法的优缺点和适用范围	337
7.6	高应变动力试验法的应用	343
7.6.1	打入桩的承载力测定	343
7.6.2	打桩过程的监测(沉桩监控)	346
7.6.3	沉桩过程中各种疑难问题的处理	349
7.6.4	水上打桩的特殊需要	352
7.6.5	借助于动力检测研究打入桩的工作机理	356
7.6.6	灌注桩的高应变动力试验	359
7.6.7	特殊类型灌注桩的高应变动力试验	372
第 8 章	桩基工程的质量诊断技术	380
8.1	两种根本不同的抽样检测方法	382
8.2	诊断桩基工程质量要靠多种成桩检测方法的综合运用	385
8.3	利用提早完成的检测结果诊断打入桩的质量	390
8.4	正确判断和评定单桩的工程质量	400
8.5	桩基工程的质量诊断	402
8.6	建立完善的桩基工程质量保障体系的必要措施	404
第 9 章	在桩基质量诊断中应用波动技术的若干问题的探讨	410

9.1	低应变反射波法中正确实施锤击的基本要求	410
9.2	低应变反射波法中实测初始应力波的研究	414
9.3	低应变反射波法的信号处理问题	418
9.4	低应变反射波法中常见干扰信号的成因和应对措施	421
9.5	低应变反射波法信号解读中的几个特殊技术问题	427
9.6	利用波动技术检测桩身完整性的其他方法	433
9.7	高应变动力试验法中截面内力 $F_m(t)$ 的正确测定方法	438
9.8	拟合分析数据记录的预处理问题	443
9.9	对动阻力问题的探讨和辐射阻尼模型的应用	448
9.10	对临塑位移的探讨和“特大临塑位移”现象的研究	455
9.11	关于在拟合分析中土阻力激发不充分问题的探讨	464
9.12	关于阻抗拟合问题的探讨	466
术语		471
符号		475
参考文献		483

第 1 章 概 论

在建筑场地的表层或浅层的土质不足以承载拟建中的建筑物时，必然的措施是采用深基础，把建筑物的荷载传递到下部承载力更好的土层上去。在各种类型的深基础中，应用最为广泛的是桩基。我国每年的用桩量极为巨大，且增长速度极快；据建设部 2003 年的资料^[5012]，我国每年的用桩量已超过 300 万根。桩基工程的造价，大体要占到建筑物总造价的 20%~30%；而在码头等特殊构筑物中，甚至高达 40% 以上。由此可见，桩基工程的质量究竟如何，对合理降低建筑物的造价意义重大；桩基出现质量问题，则将从根本上严重危及建筑物的安全。

但是，桩基深藏于地下，实际设置完成的桩身情况和周围土体在其设置过程中的变化都很难得到有效的监控，最终形成的桩土体系的实际性状也极难得到深入的揭示和准确的评价。

本章将围绕质量诊断技术对桩基工程的作用这一中心问题，从桩基工程对质量诊断的特殊需要、传统技术的不足、新技术的发展及目前的应用状况等方面作概括的分析与说明。

1.1 桩基工程质量诊断的目的和对象

桩基工程的质量取决于两个前后相连的环节：一是设计质量，主要是指图纸上的桩基是否真正能够提供设计者所预期的承载力和施工的可行性；二是施工质量，主要是指按设计要求和规定的工艺完成的桩基工程是否真正达到设计所预期的性能要求。

由此可见，对桩基工程进行质量诊断的目的具体有两个：

① 检验设计质量，确定设计是否正确，即设计出来的桩基是否真正能够满足上部结构的荷载要求。为了达到这个目的，一般需要在施工开始前专门为试验来制作试桩，并在施工开始前完成检测。这种试验在我国被称作“设计阶段试桩”，西方文献中则常常被叫做“前期试验” (Preliminary test) 或“施工前试验” (Preconstruction test)。传统的方法就是静载荷试验，要求试验一直做到试桩的承载力极限状态出现；桩的极限承载力就由少量试桩的试验结果适当地取平均后确定。有时候，受到检测设备或其他条件的制约，无法使试验达到规定的终止条件而未能获得实测的极限承载力，试验就是不充分的，就不得不把试验中实际施加的最大荷载量作为已经证实的承载力来考虑，一定程度的浪费就难以避免。由于事先必须到现场设置试桩，设计的施工工艺可行性也就得到了实际的验证。对于安全等级不高的桩基工程，或者在相近条件下已经具备充分经验的设计，设计阶段的试桩可以完全不做，也可以延后到工程桩上和下面要讲的“工程验收试验”合并完成。

② 检验施工质量，确定实际完成的桩基是否达到设计所规定的要求。这种检测，国内外都称之为“工程验收试验” (testing for acceptance)。在已经完成的工程桩上，验收

试验只能抽样进行；如果需要检测工程桩的承载力，常规的做法还是静载荷试验。为了证明试桩的极限承载力和沉降能够满足设计要求，工程验收试验原则上并不需要做到破坏而可以止步于设计要求或稍微超过一些。但是，如果事先并未做过“前期试验”而工程桩的表现又不够理想，则难免为追溯其设计有无问题而需要把部分试验一直做到破坏。换句话说，两个不同阶段的试验即使合并，仍然必须分清两个不同的试验目的而采取不同的措施，才能对试验结果作出正确的解释而确保桩基工程的质量。

关于桩基工程质量诊断的对象，必须着重指出以下几点：

① 所谓桩的质量，必须理解为一个复杂的“桩土体系”（pile-soil system）的物理力学性状，其中不仅包括桩身本身，而且还要包括桩周〔包括桩底（pile bottom）和桩侧（pile shaft）〕的部分与之相结合的土体。因为桩的施工过程不可避免地导致周围一定范围内的土体发生一系列复杂的变化；而桩对上部结构的承载能力，也将取决于桩和桩周土体的共同工作。

② 桩基质量的诊断对象应该是整个桩基工程而并非仅限于少量试桩本身。换句话说，桩基工程的质量诊断必须要着眼于全部工程桩的实际性状分布情况而从中进行合理的抽样检测，试桩的数量和选择必须满足可靠地判断整个桩基工程质量的需要。

③ 为了获得有效的检测和试验结果，试桩原则上都应该是已经处于其正常工作状态的桩而并非施工刚结束的桩。众所周知，在桩的施工中，所有桩型的桩周土体都会受到扰动而需要一定时间的恢复，桩身和桩周土体之间的结合状态也需要经过一定的休止期才能达到正常的工作状态，灌注桩的混凝土则还有一个凝固和增强的过程。

在本书中，我们将用术语“成桩”（pile installed）来界定工程桩在施工完成并休止一定时间后的特定状态。在文献中，“成桩”这个术语的出现似乎并不久远，其含义也不太确定：有时被理解为桩的施工过程；有时指施工刚结束时的状态；有时则指休止一定时间后的特定状态。在本书中，我们把桩的施工过程称为桩的设置（pile installation），打入桩的设置过程可简称为“沉桩”（pile driving），灌注桩的设置过程则可以概括为“成孔与浇筑”。无论是打入桩或灌注桩，只有在设置完成后又多少经历了一定休止期后才可以算是“成桩”。于是，凡是在成桩上进行的各种检测就可以统称为“成桩检测”。传统的静载试验法就是成桩检测方法的典型代表。

桩基工程的质量需要从其整个工作流程上来加以控制，但是，最终的质量状况则只有通过成桩检测来加以查明和认定。因此，成桩检测无疑是桩基工程质量诊断的决定性环节。

1.2 成桩检测技术的发展概况

为了查明桩基的实际质量，最早被采用的方法就是在成桩上进行静载试验。为此，要在桩顶上按照预定的程序逐级增大静态的荷载，同时实测桩顶的沉降；静载试验的直接成果是试桩的“荷载-沉降”曲线，根据这一曲线的形态变化就可以确定桩的极限承载力及其在使用状态下的沉降值。长期以来，成桩的现场静载试验可以说是确保桩基工程质量的唯一的手段。总的说来，静载试验的优点是技术简单而结果明确，其缺点则是费时费力和成本很高。因此，把这种检测方法用于工程，就不得不尽可能减少检测数量。有关静载试

验法的技术特点,我们将在第3章中作详细的说明和探讨。

应该说,对于各种打入桩工程来说,静载试验还是比较适应的,因为打入桩的桩身都是预制的,其质量容易得到保证。每一根工程桩的沉桩过程又都要经过严峻的“锤炼”和收锤标准(driving criteria)的定量监控(收锤时预定的人土深度或贯入度标准),不仅能够很大程度上控制其设置过程,并且能够保证同批工程桩相互间的一致性,少数情况异常的个体(如断桩或不能到位的桩)也都能及时发现而另作个别处理。因此,对于打入桩工程来说,检测工作面临的工程桩群体总是具有较高的均质性,实际只需采取较少的随机性抽检就能获得颇具代表性的定量结果而基本确保桩基工程的质量。在这种情况下,少量的静载试验确实能够解决问题。

但是,随着各种工艺复杂的灌注桩的应用,其设置过程不再经过“锤炼”,原来有利于承载力的土体挤密被土体置换所取代,桩身及桩周土体的状况变得越来越难以监控而问题丛生。在这种情况下,桩基检测工作面临的是均质性严重下降的工程桩群体,数量不可能增多的静载试验结果就失去其有效性,传统检测方法的局限性被暴露无遗。显然,如果整个工程桩必须按质量相同或相近的原则分成许多批组,立足于随机抽检的静载试验数量就会增加许多而成为难以完成的沉重负担。另外,超长桩、特大型桩、特高承载力桩和单桩单桩工程的出现,也成为静载试验难以承担的课题。

桩基技术的发展迫切需要新的成桩检测技术,而新技术的出现又离不开相关的基础科学与技术的发展。正是在20世纪后半期,世界范围内出现了一个近代高科技迅猛发展的高潮。于是,在桩基检测领域内,人们开始尝试应用多种近代的新技术(包括近代的动态测试和分析技术,波动理论的应用技术,还有日新月异的计算机技术)来开发各种新的成桩检测方法。

为了使检测工作变得更加便捷,一个普遍采用的方法就是用动力作用取代静力荷载。在原理上,动力试验可以分为两大类:第一类基于振动理论,根据检测对象在动力作用下的振动形态来获得预期的结果;第二类则基于波动理论,根据动力作用在检测对象内引发的应力波(stress wave)的传播性态来获得预期的结果。

在振动试验方面,法国的建筑和公共工程试验研究中心(CEBTP)在20世纪60年代率先开始采用作用于桩顶的稳态的简谐力,通过逐级提高振动频率的扫频试验来研究桩的性状。在随后的几十年中,曾经提出的振动试验方法不下数十种。特别是在我国,有不少属于此类的桩基检测方法曾经获得过相当广泛的应用,其中比较著名的方法,如机械阻抗法和动力参数法,还编入了建筑行业的标准JGJ/T 93—95^[5002]。但是,长期的工程实践证明,在此类方法中,只有机械阻抗法及其他某些类似的方法在检测桩身的质量方面是成功的。由于此类方法的理论分析实际只能应用于弹性范围内,在检测桩的承载力方面就不得不依赖于各种经验系数而难以获得可靠的结果。于是,绝大多数基于振动理论的成桩检测方法,都因未能经得起工程实践的考验而逐渐销声匿迹。至于机械阻抗法,虽然在检测桩身完整性方面具有数据稳定、重复性好和结果可靠等突出的优点,却因为所需设备比较复杂、现场操作比较麻烦和费时费力而被基于波动技术的反射波法所取代。

与此同时,基于波动理论的成桩检测方法却经受住了工程实践的考验而成为桩基检测新技术的主流。世界各国的实践经验已经表明,在众多成桩检测的新技术中,可以说只有波动技术一枝独秀。

法国的建筑和公共工程试验研究中心(CEBTP)在开发振动试验方法的同时,在波动技术方面,还进行了声波探测法在桩身上的试验研究,首先提出利用透射波来检测桩身质量的就是该中心的 Paquet J. (1969),在中文文献中我们可以读到 Carracilli J. (1974)的报告^[C079]。

也就在 20 世纪 60 年代,美国的 CASE Western Reserve University 的 Goble G. G. 教授及其研究小组接受 Ohio 州交通局的委托,承担起开发一种能够比动力打桩公式更加经济实用和可靠的监控打桩过程的方法。为此,研究小组提出在锤击下同时采集桩顶附近某个截面的动力响应(包括力和加速度),然后采用基于一维波动理论的分析计算方法推算桩的实际承载力。此项研究课题于 1975 年完成,其中包括数据采集的成套设备(PDA 打桩分析仪)和利用一维波动方程的闭合解求解桩周土体对桩的静态承载能力的多种算法;在最终提交的研究总结报告^[W035]中,Goble 提供了 102 个动静对比数据来验证其可靠性。Goble 的这一整套技术后来就被称为 CASE 法。

在承担政府委托任务的同时,Goble 及其同事建立了自己的公司(GRL 公司和 PDI 公司),利用当时迅猛发展的计算机技术改进了动力试验的仪器设备,开发了根据实测曲线进行拟合分析的数值解法,推出了能够获得土阻力分布的分析程序 CAPWAP。这一技术后来被世界许多国家广泛采用,逐渐取代 CASE 法而成为确定桩的竖向承载力的主要分析方法。经过多年的改进,CAPWAP 拟合分析程序和 PDA 打桩分析仪后来都发展为该公司的系列产品。

也是从 20 世纪 60 年代起,荷兰的半官方组织 TNO-IBBC(荷兰应用科学研究机构下属的建筑材料与结构研究院)开始研究开发脉冲回声法,后来发展为目前常用的低应变反射波法。TNO 在 1971 年前后研制出了世界上第一台低应变反射波法的定型检测设备并广泛应用于其国内的桩基工程中,比其他国家大体要早十几年。TNO 的仪器被冠以 FPDS 的名称,即所谓“基础桩的诊断系统(Foundation pile diagnostic system)”;经过多年的不断改进而发展为一个系列,后来还从单纯的低应变反射波法扩展为多用途的仪器。

TNO 也同时开发了检测桩的承载力的方法。该院的 van Koten H. (1974)考虑桩侧阻力对应力波的衰减作用,利用线性代换和阶跃函数得出了无限长桩在锤击下的闭合解,编制了相应的计算程序 TNOWAVE,这个程序后来也增加了拟合分析的内容。另外,还有瑞典的 Uppsala 大学研制了 PID 型打桩分析仪,也附有类似于 CASE 法的闭合解法。

到了 20 世纪 80 年代,亚洲、澳洲和北美洲的许多国家开始大量应用灌注桩,桩的完整性检测技术开始受到更大的重视。随着国际交流规模的扩大,特别是计算机技术和动态信号处理技术的发展,桩的完整性检测技术迅速发生了根本性的改变。在 20 世纪 80 年代中期的国际会议上,有人提出可以利用快速 Fourier 变换(FFT)技术把简单易得的冲击激振下的脉冲响应信号转换到频域内进行分析。这一做法在脉冲反射波法原有的全套现场操作和时域分析技术的基础上,增加 FFT 时域频域变换技术来获得实测信号的频谱及各种频域分析的内容,从而使桩的完整性检测技术达到了一个新的高度。这种做法在 1988 年发表的文献中曾经被称为“改进的冲击法”^[W018]。

1990 年前后,美国的 PDI 公司提出在检测桩顶的速度响应同时实测锤体的作用力,并把这种方法命名为“桩身完整性检测的 FV 法”(P. I. T.-FV 法)^[W103],并随即推出了实用的硬件和软件。在美国的 ASTM 标准 D 5882 中,把冲击激振和单纯采用时域分析的方

法命名为“脉冲回声法”(Pulse echo method, 简称 PEM 法), 而把同时采集锤击力和桩顶速度并吸收频域分析技术的方法命名为“瞬时响应法”(Transient response method, 简称 TRM 法), 两种方法的总称过去是“低应变桩身完整性试验法”(Low strain pile integrity testing method), 在 2007 年的新版^[W008]中又改称为“低应变冲击完整性试验法”(Low strain impact integrity testing method)。

实际上, 经过多年的演变和发展, 这种利用冲击激振获取桩身响应, 以时域分析为主又辅以频域分析的成套技术已经成为世界各国在检测桩身完整性时的常规做法, 在多数情况下也不需要检测激励力。遗憾的是, 这种方法在我国以至国际上至今还没有统一的名称。美国 ASTM 标准的两个名称实际都不符合现实中的常规做法, 因为 PEM 法不涉及频域分析, 而 TRM 法又要求检测锤击力并侧重于频域分析。

此外, 大致在 20 世纪 70 年代, 国外开始把金属探伤技术移植到桩基检测中来。为此研制了专用于非金属材料的声波检测仪器, 根据探头在预埋于桩身内的测管中检测到的应力波传播速度来查明混凝土桩身的实际性状。

从 1980 年开始, 有关国家发起组织了题为“应力波理论在桩基中的应用”的国际会议, 每隔 4 年举行一次, 成为世界各国交流相关技术的集中场合, 历届会议的论文集也成为反映有关动态的主要文献记录。

中国在 20 世纪 70 年代开始关注这一新的技术领域。南京工学院(现名为东南大学)的唐念慈教授在介绍这一新技术方面作出了很大的贡献。20 世纪 70 年代末, 我国部分科研院所和设计院开始相继购入国外的专用动力试验仪器, 其中绝大多数是美国 PDI 公司生产的 PDA 打桩分析仪; 1979 年, 冶金部建筑研究总院经仪器进出口总公司购入第一套 CAPWAP 拟合分析软件。20 世纪 80 年代以后, 由 PDI 公司生产的 P. I. T. 桩身完整性检测仪器也在我国大量出现。

从 20 世纪 80 年代开始, 利用波动技术的动力试验方法在我国得到极为广泛的应用。由于我国地域广袤, 建筑工程规模极大, 采用波动技术来检测的桩基工程类型及其具体试桩数量, 都远远超过了西方许多应用此项技术多年的国家。我国少数有实力的单位开始自行开发和研制此类动力试验的专用仪器和装备, 编制拟合分析软件。其中部分较好的产品随即也被投入市场, 逐渐成为我国许多地方性院所的主要装备。

从第一届国际会议开始我国就一直有代表参加, 在历届的论文集中, 也发表了许多来自我国的有关文章和报道, 引起了国外同行的注意和赞许。

目前, 经过多年的发展, 基于波动技术的成桩检测方法在世界范围内得到基本肯定和普遍应用的有以下 3 种^[C024]:

① 透射波法(简称 SL 法): 在预设于桩身中的测孔中横向或斜向激发应力波, 利用透射波来检测桩身上下各部位的波速分布情况, 从而对测孔附近和相互间的桩身材质和结构完整性作出判断。这个检测方法适用于中等直径以上的混凝土灌注桩。有关透射波法的技术特点和具体应用情况, 我们将在第 4 章中作详细的说明和探讨。

② 低应变反射波法(简称 LST 法): 在桩顶(pile top)向下激发低能量的应力波并检测来自桩身上下的各种反射波, 利用一维波动理论进行分析计算可以分辨出桩底和其他存在阻抗(impedance)变化的桩身截面, 并对这些截面的物理力学性状作出定位的、定性的甚至定量的判断, 从而对整个桩身的结构完整性作出判断。这个检测方法主要适用于各种直

径的混凝土灌注桩,也可以用于没有接头或接头密实性较好的预制打入桩和部分强度较高的柔性桩。有关低应变反射波法的技术特点和具体情况,我们将在第5章中作详细的说明和探讨。

③ 高应变动力试验法(简称 HST 法):通过桩顶的高能量冲击引发桩身与桩周土体的相对运动,此时在桩顶附近采集到的反射波将不仅带来桩身阻抗变化的信息,而且也将带来桩周土体的阻力信息。于是,同样利用一维波动理论进行分析计算就不但能够确定桩身初始的完整性,而且还能获取桩周土体对桩身的竖向承载能力和桩身在冲击前后的结构变化,从而对桩周土体对桩所能提供的承载能力和桩身所能承受的动力作用作出判断。这个检测方法适用于各种强度较高的桩型的承载力和完整性检测。根据分析方法的不同,高应变动力试验法又包括两种有着根本差别的方法:一是利用近似假定对波动方程求解,直接获得桩周土体对桩身的总阻力,然后利用经验系数推算出总的静阻力而确定其承载力,这种方法在原理上属于闭合解法,其代表性的应用解法是 CASE 法;二是利用数值方法通过拟合分析获得桩身阻抗和桩周土体动静阻力分布的最优解答,然后再根据桩周土体对桩的静阻力分布判断单桩的承载力,这种方法在原理上属于数值解法,其代表性的应用解法是实测曲线拟合法。有关这两种高应变动力试验法的技术特点和具体情况,我们将在第6章和第7章中分别作详细的说明和探讨。

据不完全统计,全世界已经有 40 多个国家在桩基检测中采用了各种波动检测方法^[W104]。其中有些国家,经过多年的发展和工程实践的考验,认为动力检测方法已经成熟,可以列入常规的检测方法而为之编制或制定各种等级不同的官方的或非官方的技术文件(法规、标准、规范、规程、准则、建议或手册),颇具规模地在世界范围内形成了一个在桩基工程中应用波动技术的规范化进程。

1998 年 6 月,在维也纳召开的国际深基础会议上,由 Rausche 发起组织了几个在这方面相对领先的国家的专业人士联合报道了这一新技术在标准化方面的进展情况^[W106],我国参与其事的人随后也在国内做了相应的报道^[C025]。

根据上述报道,再加上近年来新出的规范规程,可以把世界各国涉及桩基波动法检测的技术文件汇总如表 1.2.1 所示。

世界各国涉及利用波动技术检测桩基的主要技术文件

表 1.2.1

文件 国家	综合性规范	专门的检测规范、规程或标准		
		声波透射法 (CSL)	低应变法 (LST)	高应变法 (HST)
澳大利亚	AS 2159—1995			
巴 西	ABNT-NBR 6122	—	—	NBR-13208 (1994)
加 拿 大	Canadian Engineering Manual (1992 年第 3 版), Ontario Bridge Code(1991)			
中 国	GB 50007—2002(1974) JGJ 94—2008(1995)	JGJ/T 93—95		JGJ 106—97(已废止)
		JGJ 106—2003		
法 国	—	NFP 94—160—1 (1993)	NFP 94—160—2, 4 (1993)	—
德 国	—	—	DGEG: Recommendation for LST(1986)	DGEG: Recommendation for HST (1986)

续表

国家 \ 文件	综合性规范	专门的检测规范、规程或标准		
		声波透射法 (CSL)	低应变法 (LST)	高应变法 (HST)
墨西哥	—	—	—	Construction manual (1987)
挪威	Peleveiledningen (1991)	—	—	—
瑞典	—	—	—	SGL Handbook (1993)
英国	ICE: Specification for piling, Chapter 11(1988)			
美国	—	ASTM D 6760-08 (2002)	ASTM D5882-07 (1995)	ASTM D4945-08 (1989)

注：表中所列名称是这些技术文件现行的最新版本，名称后括弧内的数字则是指该文件第一版的制定年份；有的国家的文件名称中已经包含年份或不知其初版年份，则不再加括弧。

纵观上述各国的技术文件，我们可以看到：在桩基检测中采用波动技术已经在世界范围内得到广泛的认可，各国的推广进度虽然还有很大的差别，但推广的趋势是确定无疑的。可以相信，随着时间的推移，动力检测方法必将很快成为世界各国在桩基检测方面普遍采用的常规方法。

在推广波动技术过程中，各国的态度是既积极又谨慎。许多技术文件的出台都经历了长期的酝酿、反复的修改和严格的审定。有些国家为每种方法都制定了严格的标准，对其使用范围、操作程序、检测数量甚至从业人员资质，都作出明确的规定。

有关各国规范规程的异同，在参考文献 [W106] 和 [C025] 中有比较详细的说明和对比。

1.3 我国保障桩基工程质量的基本做法

我国的建筑行业对桩基工程的设计质量和施工质量都有相应的规范、规程和其他法定性技术文件来加以确保。因此，我们可以从有关设计和施工规范规程的条文规定来观察我国保障桩基工程质量的基本做法。

对于建筑行业来说，确保桩基设计质量的国家标准是《建筑地基基础设计规范》，现行的版本是 GB 50007—2002；确保桩基施工质量的国家标准是《建筑地基基础工程施工质量验收规范》，现行的版本是 GB 50202—2002^[S010]。在 1981 年，适应发展灌注桩的需要，发布施行了一本综合性的设计与施工的规程《工业与民用建筑灌注桩基础设计与施工规程》(JGJ 4—80)。在 1995 年，又有一本把设计与施工综合在一起的全国性的行业标准《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—94)^[S001]发布施行，并在 2008 年被修订为《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[S014]。此外，在 2003 年，建筑行业还批准执行了一本集各种成桩检测方法之大成的《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2003)^[S012]。

下面，我们分两个小节来分别说明我国在保障桩基的设计质量和施工质量方面的基本措施和具体规定。

1. 保障桩基设计质量的现行做法

在我国现行的规范规程中，涉及设计阶段成桩检测的有：《建筑地基基础设计规范》

(GB 50007—2002)、《建筑桩基检测技术规范》(JGJ 106—2003)和《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)。

纵观这些规范的相关条文可以得出这样的结论:对于设计阶段的成桩检测,我国的基本规定是根据现场的静载试验结果来确定桩基的设计承载力。对于每种同一条件下的工程桩,要求的最低试桩数量是2~3根,同时还希望不少于总桩数的1%。

众所周知,原型结构的载荷试验不仅十分费时费力,而且成本极高,一般都用于研究工作而尽可能在专门的大型试验室内完成。事实上,除桩基以外的各种类型的建筑结构,都可以根据所用材料的特性经过设计计算直接确定其承载力,只有极少数非常特殊或实在难以把握的新型结构才需要补充完成现场的载荷试验。

但是,对于桩基来说却不可能这样做,原因之一是由于隐蔽于地下的桩身、桩周土体以及桩土间的结合状态都难以确切控制和把握;原因之二则是现有的各种根据地质勘探所获得的土层性态来预估桩的承载力的方法都并不可靠。就以确定土层静阻力的标准值问题来说,桩基的设计者可以按地区性规范的经验性建议(基于当地静载试验结果统计得到)来取,也可以直接根据钻探取样或原位测试资料进行估算。举例来说,对于软—中等密实黏土中的摩擦桩的侧阻力,可以根据土工实验资料所提供的不排水抗剪强度或按有效应力理论来进行估算;对于粒状土中的桩,还可以根据贯入试验(SPT或CPT)来估计。但是,不论采用什么方法,这些对于阻力的估计实际都并不可靠,尤其是对密实砂和胶结土。大量的工程实践表明:砂土的实际侧阻力往往要比土工实验和贯入试验结果高出许多;胶结土(如石灰质砂土)则因为其结构在打桩中可能遭到破坏,实际的侧阻力又会比贯入试验结果偏低;黏性土的阻力因时效的影响而需要随时间的推移多次加以检测,即使根据少量的静载试验资料也难以得出可靠的结果。

应该说,把静载试验这种昂贵的成桩检测方法选作桩基质量保障的决定性定量手段实际是一种无奈的选择,为此,人们还不得不把检测的数量尽可能减少到最低的限度。

静载试验能够提供的实测结果主要是“荷载-沉降”曲线,根据这条曲线可以确定两个基本参量:与规定的破坏特征相对应的极限承载力和使用状态下的桩顶沉降量。由此可见,我国保障桩基设计质量的关键判据实际仅限于这样两个基本的参量,决定性的手段是现场的静载试验,而最终采用的定量指标则来自数量极少的检测结果。

从20世纪90年代开始,为了减轻静载试验所带来的沉重负担,人们开始考虑如何减少此类试验的数量,规范规程的规定也开始出现一些变化。但是,仔细分析上述几种现行规范的条文,我们可以发现相互间并不完全一致。

① 作为国家标准的《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002),只允许在初步设计时采用当地静载试验经过统计分析所得的土阻力值来推算桩的设计承载力,只有丙级的建筑桩基允许采用静力触探及标准贯入试验参数来加以确定,而所有甲级和乙级建筑桩基的设计承载力都必须通过单桩竖向静载荷试验确定。按照该规范表3.1.2的规定,只有“场地和地基条件简单,荷载分布均匀的7层及7层以下民用建筑及一般工业建筑物;次要的轻型建筑物”才可以列为丙级建筑。换句话说,稍稍复杂一些的建筑物都必须在其设计阶段为所采用的每种不同的桩进行静载试验2~3根。此外,规范只允许对单桩承载力很高的大直径端承型桩和符合一定条件的嵌岩桩改用持力层的平板载荷试验。

② 作为行业标准的《建筑桩基检测技术规范》,规定只有当设计有要求或设计等级