

966267

U443.15
2534

高等学校试用教材

混凝土灌注桩质量 无损检测技术

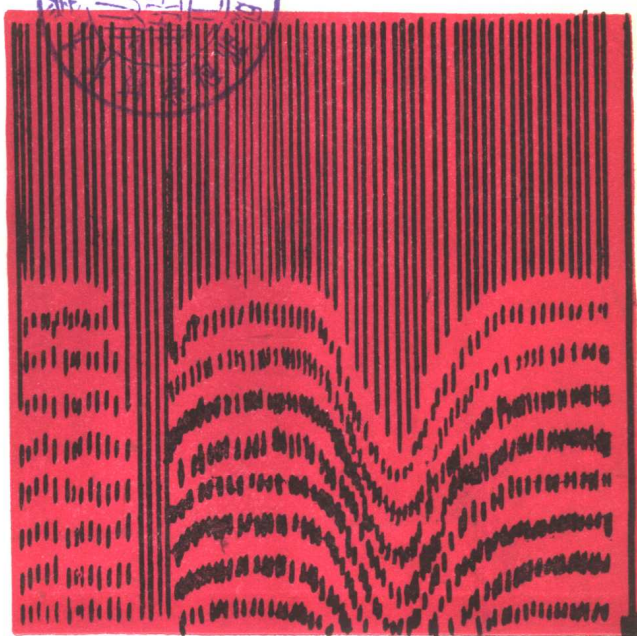
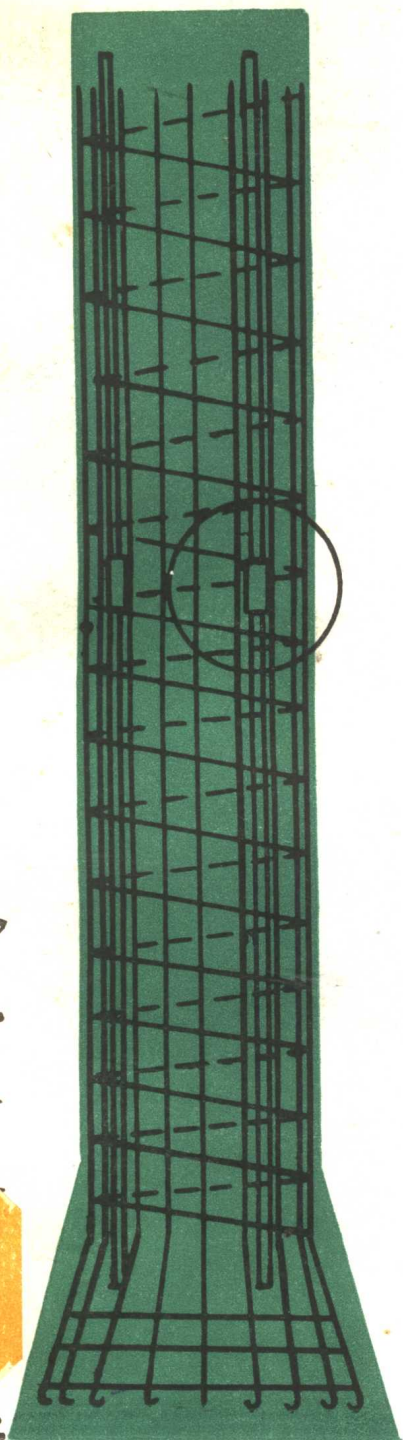
(桥梁工程专业用)

朱之基

主编

江祖铭

主审



人民交通

社

15

966267

U443.15
2534

高等学校试用教材

混凝土灌注桩质量无损检测技术

Hunningtu Guanzhuzhuang Zhiliang

Wusunjiance Jishu

(桥梁工程专业用)

朱之基 主编

江祖铭 主审

人民交通出版社

(京)新登字091号

高等学校试用教材
混凝土灌注桩质量无损检测技术
(桥梁工程专业用)

朱之基 主编

江祖铭 主审

正文设计: 周 圆 插图设计: 王惠茹 责任校对: 尹 静

人民交通出版社出版发行

(100013北京和平里东街10号)

各地新华书店经销

北京通县向阳印刷厂印刷

· 开本: 787×1092 1/16 印张: 10.5 字数: 253千

1993年6月 第1版

1993年6月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—3000册 定价: 2.75元

ISBN 7-114-01421-X

U · 00949

内 容 简 介

本书较全面地介绍了混凝土灌注桩质量无损检测技术中比较常用的各种方法，并着重对静载试验法、超声脉冲法、辐射能法、应力波法、冲击响应时域分析法、水电效应法和机械阻抗法等作了分章论述，对这些方法所涉及的基础理论、测试设备、检测分析技术和判别基桩质量(包括承载力)的方法等都有系统而完整的说明，并附以实例。

其中除超声脉冲法和辐射能法只能用于就地灌注桩外，其余方法在需要时亦可用于预制打入桩。

本书可供高等院校研究生和本科生作选修课教材用，并适合于从事基桩质量检测工作的工程技术人员学习参考，以充实理论、提高检测技术和质量的分析判断能力。

前言

从70年代中到80年代末,我国基桩质量无损检测技术(包括桩身完整性判别和单桩承载力估算)的发展非常迅速,形势是可喜的。除了引进部分国外的现代成套桩检技术外,依靠我国自身的力量研究和发展起来的,已先后用于生产或正在研究中的就有十多种方法。检测分析仪器的研制,亦有了同步地发展,已出现了一些专用检测分析设备,例如RSM系列桩基信号检测分析仪等。据不完全统计,全国已有约160多个单位从事基桩无损检测工作,还有不少单位已立题研究或正在筹备开展这项业务。

但是,我国基桩质量无损检测技术的研究和应用毕竟为时不长,尚处于继续发展和不断完善的阶段,因此各种方法都会不同程度地存在一些问题或不足之处。这些问题所涉及的范围是多方面的,有涉及理论基础和测试分析技术方面的,亦有涉及分析原理和判别方法方面的。另一方面,桩检工作系生产之需要,经济效益较高。一旦形成市场,必然引入竞争机制,继而会出现互相技术保密,严重影响技术交流和存在问题的研究解决。在这种情况下,凭经验的因素增加了,也阻碍了这项技术的传播和推广应用。

1989年4月,由中国振动工程学会土动力学学会主持召开的全国桩基动测学术会议指出目前桩基动测方法多样,技术水平不一,个别地方也有造成基桩质量误判等失误,给动测声誉产生不良影响。会议对桩基动测市场呈现某种混乱现象表示关切。为推动我国动测技术的健康发展和更有效地为工程建设服务,建议国家有关部门组织技术培训,为从业人员充实理论,提高测试水平。(见该学会《简讯》1989,第5期)。

鉴于上述情况,似有必要试编一教材,一方面适应高校研究生和本科生作选修课的需要,填补目前桩检技术教材的空白;另一方面也可供从业人员学习参考,以充实理论,提高测试技术和分析判断水平。这就是编写此书的初衷。然而要完成这一任务是有一定困难的,如因篇幅所限,无法包揽国内外所有现行方法,基于我们的水平,亦无意编写成一本“大全”,因而只能立足于国内,把重点先放在国内比较通行的几种主要方法上,而且以混凝土灌注桩的检测为主要对象,其中动力法则又以低应变动力法为主。对于预制打入桩,因其预制混凝土桩身质量有保证,打桩过程中对断桩事故能有所察觉,桩的承载力常通过贯入度控制或应用高应变动力法解决,所以不作为本书的主要对象。当然也不排斥低应变动力法在预制打入桩上的应用。

桩检技术涉及的学科领域较广,不论从理论或实践角度看,它反映了包括诸如地球物理、核物理、岩土工程、振动工程、超声工程、电子工程、土木工程等多种学科的相互渗透和综合应用。要将每种方法阐述清楚,势必涉及多种学科知识,实难面面俱到。除力求将每种方法的理论基础、假设前提、测试和分析技术、判别方法等阐述清楚外,凡涉及各个领域的其他一般知识,只能留给读者自行寻找专业书了解。在内容安排和叙述方法上则力求系统、简洁、明了,便于从业人员学习提高并应用。

桩检技术正处于继续发展和不断完善之中,此书与读者见面之日,如发现部分内容已滞

后于技术现状的情况是完全有可能的。我们认为，只要能充分了解和掌握某项技术发展中现阶段，并打好其理论基础，必将有助于对其后新阶段成果的吸收和消化。至于本书中其他缺点和错误，限于水平，实属难免，望读者批评指正。

本教材经全国高校路桥专业教材编审委员会1988年上海会议讨论通过列入教材出版计划。由湖南大学朱之基主编，西安公路学院江祖铭主审。全书由湖南大学吴慧敏(编写第三、四章)、王贻孙(编写第二、五、七章)和朱之基(编写前言、第一、六、八章)三人合作完成。

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 我国钻孔灌注桩应用概况和存在问题	(1)
第二节 我国钻孔灌注桩质量检测技术概况	(2)
一、直观检查法	(2)
二、辐射能检测法	(4)
三、静载试验法	(5)
四、高应变动力检测法	(5)
五、低应变动力检测法	(7)
第二章 桩静载试验结果分析	(8)
第一节 静载加荷方式简介	(8)
一、慢速维持荷载法	(8)
二、等贯入速率法(CRP法)	(8)
三、慢速维持荷载与等贯入速率结合法	(8)
四、等时间间隔加载法(快速维持荷载法)	(9)
第二节 由静载试验曲线确定桩的极限荷载及屈服荷载的方法	(9)
一、由P—S曲线所得转折点的确定方法(拐点法和切线交会法)	(9)
二、由P—S曲线坐标变换的确定方法	(9)
三、由桩顶下沉量的确定方法	(10)
四、由循环加载卸载试验曲线的确定方法	(10)
五、由桩顶下沉随时间变化曲线的确定方法	(11)
六、桩屈服荷载的确定方法	(11)
七、GBJ7—89规范法	(11)
第三节 试桩加载未达到极限荷载时极限承载力的估计	(12)
一、双曲线法	(12)
二、抛物线法	(13)
三、指数方程法	(13)
第四节 单桩容许承载力的确定	(14)
一、由极限荷载除以安全系数的方法	(14)
二、根据单桩静载试验结果的直接确定法	(14)
第三章 超声脉冲检测法	(16)
第一节 超声脉冲检测法的基本原理	(16)
一、超声波特性概述	(16)
二、灌注桩超声脉冲检测的基本原理	(24)

第二节 超声脉冲检测装置	(27)
一、超声换能器	(28)
二、超声检测仪	(31)
三、探头升降装置	(33)
四、数据采集、处理、显示系统	(34)
五、灌注桩全自动超声脉冲检测系统	(35)
六、桩内声测管的预埋	(36)
第三节 灌注桩混凝土缺陷的判断	(38)
一、数值判据法	(38)
二、声阴影重叠法	(43)
三、灌注桩缺陷判断实例	(45)
第四节 桩身混凝土强度及均匀性的推定	(47)
一、桩内混凝土总体平均强度的推算	(48)
二、缺陷区强度的估算	(49)
三、灌注桩混凝土均匀性评价	(50)
第四章 γ—射线辐射检测法	(51)
第一节 γ —射线检测的基本原理	(51)
一、 γ —射线与物质的相互作用	(51)
二、辐射衰减与材料密度及穿透厚度之间的关系	(52)
三、 γ —射线的反向散射	(53)
第二节 γ —射线检测装置	(55)
一、 γ —射线源	(55)
二、 γ —射线探测器	(56)
三、探头升降装置	(57)
四、微机控制、数据处理及输出系统	(58)
第三节 γ —射线检测方法	(59)
一、 γ —射线穿透法	(59)
二、 γ —射线反向散射法	(61)
三、 γ —射线的安全防护	(62)
第五章 动力检测法(一)——应力波法	(64)
第一节 弹性直杆中的波传播理论简述	(64)
一、D'Alembert解答	(64)
二、边界效应	(65)
三、在杆体性质突变处弹性波的反射与透射	(67)
四、杆受冲击后的各种波及其波速简述	(68)
第二节 应力波反射法(一)	(69)
一、试验方法及记录曲线	(69)
二、注意事项	(70)
三、工程实例分析	(70)

第三节 应力波反射法(二)	(71)
一、单道地震仪检测法	(71)
二、反射波法实测曲线的判读	(72)
第四节 应力波反射法(三)	(75)
一、沿检波器轴向水平激励法	(76)
二、SH波多次反射检测法	(76)
第五节 人工地震波竖向折射波速法	(77)
第六章 动力检测法(二)——单自由度系统冲击响应时域分析法	(80)
第一节 频率法	(80)
一、基本原理	(80)
二、承载力估计	(81)
三、检测系统和测试方法	(81)
第二节 频率—初速法	(83)
一、基本原理	(83)
二、承载力估计	(84)
三、检测系统和测试方法	(85)
第三节 对承载力换算系数“ η ”值的讨论	(86)
一、桩的长径比(L/d)对刚度和承载力的影响	(86)
二、不同支承条件对刚度和承载力的影响	(87)
第七章 动力检测法(三)——水电效应激振法	(89)
第一节 桩顶面在水电效应冲击作用下的纵向振动分析	(89)
一、桩顶激振下单桩振动固有圆频率及强迫振动反应	(89)
二、桩—土体系振动波传播分析	(92)
第二节 水电效应激振法的测试系统和方法	(96)
一、动力测试系统	(96)
二、放电激励及能量转换原理	(97)
三、测试方法	(98)
第三节 桩身质量判断	(99)
一、系统的动力特性分析	(99)
二、波形特征及桩身结构完整性的判断	(99)
三、工程实例分析	(101)
第四节 单桩承载力分析	(102)
一、水电效应激振力分析	(102)
二、确定单桩承载力的第一种方法	(103)
三、确定单桩承载力的第二种方法	(105)
四、工程实例分析	(105)
第八章 动力检测法(四)——机械阻抗法	(107)
第一节 概述	(107)
第二节 经典机械阻抗法的基础理论	(108)

一、机械阻抗法的基本前提	(108)
二、经典机械阻抗的定义	(109)
三、经典机械阻抗的分析方法	(111)
第三节 广义机械阻抗法的基础理论	(116)
一、广义机械阻抗的概念和定义	(116)
二、广义机械阻抗的分析方法	(117)
第四节 稳态激励阻抗法	(119)
一、两种稳态激励方法	(119)
二、人工操作和分析的检测系统	(121)
三、以桩基振动控制仪为主机的检测系统	(123)
四、以频响分析仪为主机的检测系统	(124)
第五节 瞬态激励阻抗法	(127)
一、冲击激励和响应的特点	(127)
二、以动态分析仪为主机的检测系统	(128)
三、动态分析仪的分析原理	(129)
四、仪器分析中有关信号处理的几个主要问题	(131)
第六节 随机激励阻抗法	(134)
一、随机激励的特点	(134)
二、以动态分析仪为主机的检测系统	(135)
三、分析方法	(136)
四、环境振动激励阻抗法	(137)
第七节 桩基质量检测的判据和判别方法	(138)
一、各种激励下桩的典型导纳曲线	(138)
二、判别桩基质量的判据	(139)
三、判别桩基质量的方法	(141)
四、实例	(144)
第八节 用计算机拟合实测导纳曲线判别桩身缺陷的性质和范围	(148)
一、现行方法的局限性	(148)
二、数学模型的建立	(148)
三、拟合方法和实例	(151)
第九节 共振法计算桩承载力简介	(153)
一、基本假定和原理	(153)
二、计算容许承载力的方法	(154)
主要参考文献	(156)

第一章 概 述

第一节 我国钻孔灌注桩应用概况和存在问题

在各类专业的“地基基础”课程中已对桩基广泛的适用条件作了详细的论述。概括起来,诸如在土质不良地区建造建筑物时,可利用桩基穿越上部软土层,将荷载传递到深层坚实土层上;对高层建筑和具有很大倾覆力矩的高耸结构物,桩基不仅能承受较大的竖向荷载,还能承受一定的水平荷载和上拔力;对沉降有严格要求的精密设备基础,采用桩基有利于减少沉降量;桩基还能减小机器基础的振幅,减弱机器振动对结构的影响;在地震设防区,桩基又是结构抗震的有效措施之一。在桥梁工程中,桩基的应用更为广泛。它能支承由桥跨结构传给墩台的巨大荷载,而且在河床冲刷较大、河道不稳定或冲刷深度不易计算准确的情况下,桩基亦被列为考虑的方案之一。

我国自1965年交通部首先在桥梁工程中推广钻孔灌注桩技术以来,经过20多年的不断研究和实践,不论在成孔机械、施工技术和设计方法等方面,都有了很大的发展。目前,直径从0.3m至2.2m,长度从5m至107m的各种成孔机械和相应的施工技术几乎已配套齐全,可供各种类型的结构物在各种地质条件下选用。灌注桩与打入式预制桩或沉井相比较,它施工简单,并可降低造价约 $1/2 \sim 1/3$;公路桥梁采用灌注桩基础后,墩、台型式得到简化,一般可用单排桩基础每一桥墩用1~4根桩,不必设置承台,直接用盖梁连系,基本上避免了水下作业。灌注桩施工方便,工程进度快,经济效益显著。

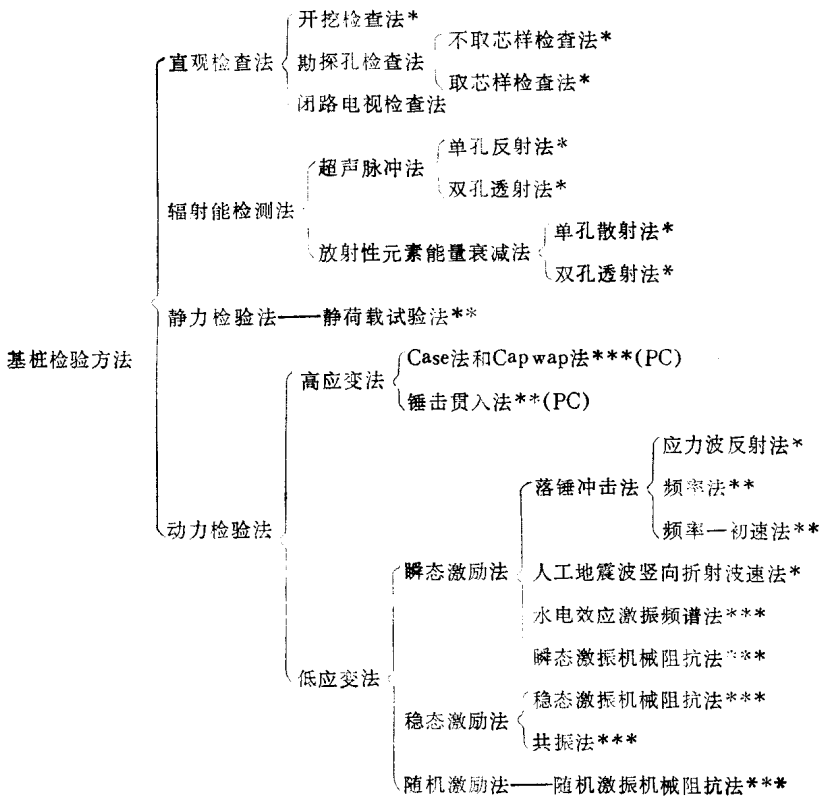
钻孔灌注桩固然有其突出的优点,但是,它的施工工序较多,工艺流程相互衔接紧密,环环紧扣,不宜长时间中断停顿;主要工序都在水下及地下进行,不便监视;同时,影响施工的正常进行和施工质量的因素很多,难以全部预见。经常遇到的主要问题是孔壁失稳导致坍孔和灌注混凝土操作不当迫使“两次灌注”,致使成桩后桩身出现缩颈、夹泥、断桩或沉渣过厚等各种形态复杂的质量缺陷,影响桩身的完整性和单桩的承载能力。然而,这些都是灌注桩本身的施工工艺特点所决定的,难以绝对避免。据有关资料报导,灌注桩存在有害缺陷的损桩率在国外约占5%~10%,在国内则达10%~20%。因此,灌注桩成桩后的质量(包括桩身完整性和单桩承载能力)如何检验,引起了工程界特别是工程监理部门的关注。

引起人们关注的另一个问题是传统的静载试验方法越来越难以适应灌注桩桩径和桩长的日益增大和承载力日益提高的特点。首先是静载试验所需的压载量之巨大或反力装置结构之庞大,已使静载试验接近难以实施的地步。加之静载试验本身特有的费时、费工、费钱的缺点,也迫使人们开始企图另谋新的途径。其次是静载试验不可能多做。除上述原因外,现行规范仍然规定静载试验试桩数不少于工程桩总数的1%,且不少于3根。这种由极少数试桩结果作为定值来评价全部工程桩整体质量的“定值”法,本已到了用扩大试桩面,按统计特性来评价全部工程桩整体质量的“概率”法取而代之的时候了。因此,新的基桩检测方法必须是简

捷、迅速、经济、而且要有利于扩大工程桩的受检面和按统计特性评价全部工程桩的整体质量。

第二节 我国钻孔灌注桩质量检测技术概况

在我国，钻孔灌注桩设计和施工技术的发展，也推动了灌注桩质量检测技术的迅速发展。在这期间，在引进和学习国外技术的基础上，结合我国桩基类型和成孔方法多样的特点，也研究和多种具有我国特色的检测方法。国内曾用过和目前正被广泛采用的几种主要方法，大致可归纳如下：



注：*——主要检验桩身完整性
**——主要估算单桩承载力
***——兼有检验桩身完整性和单桩承载力两者功能
PC——主要用于检验预制桩

一、直观检查法

(一) 开挖检查

开挖检查能将桩身混凝土的灌注质量直接暴露供详细目测，但常受地下水水位的限制。一般在经其他方法检测后，怀疑在桩身不深处存在缺陷需要验证时才采用此法。从桩周地面按一定的安全边坡下挖，甚至桩身有怀疑段的四周全部暴露。见图1-1。

国外资料曾有两则报导可供参考：英国北部一工地，为了查明某一基桩桩底与岩层的接

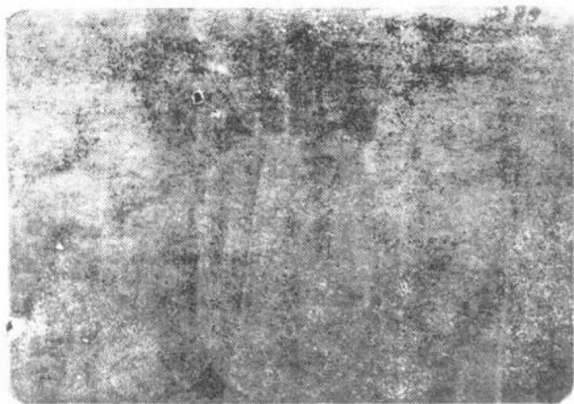


图1-1 有缺陷的灌注桩经开挖验证

触情况, 利用其相邻的尚未灌注混凝土的钻孔, 适当支护后, 再在其底部打一水平导洞而到达受检桩的桩底。另一实例是从承台一侧挖一坑道至承台底下, 主要察看桩头与承台连接处的混凝土质量, 从而发现了混凝土强度不够, 同时发现了邻桩有裂缝和露筋。这些例子当然只能在地下水位以上进行, 否则将是不经济的, 也是不安全的。

(二) 勘探孔检查法

利用工程地质钻机在桩身中钻一竖向勘探孔来检查桩身混凝土质量是我国70年代前后常用的方法。较简单的做法是钻孔时不取混凝土芯样检查, 主要靠小心仔细地监视钻进速率和回水中带出的钻渣的颜色和成分来判别混凝土强度的高低和有无夹层以及其性质。较可靠的方法是钻孔时取混凝土芯样检查, 将沿桩身不同深度的混凝土芯样依次取出, 按上下次序排列保存起来, 成为观察整桩混凝土质量的完整资料, 它能呈现混凝土离析、蜂窝、断裂、夹层等各种缺陷的形态、性质, 位置和上下范围。根据芯样的强度试验可以评定混凝土标号及整桩混凝土强度的均匀性。必要时亦可将桩底钻穿, 检查桩底有无沉渣及其厚度, 并验证持力层的性质。

钻勘探孔检查只局限于了解沿钻孔孔道上的部位, 因此对于大直径桩, 必须增加钻孔, 否则难以评定整个截面的情况。

勘探孔检查法常由工程勘探单位的熟练技术人员负责完成。它与一般工程地质钻孔不同, 在钻进过程中特别强调应有能保证钻孔竖直不偏钻的技术措施。否则, 钻孔发生偏斜, 钻头将钻破桩身侧面而进入土层中, 达不到检查整个桩身的目的, 相反极易造成误判。

钻勘探孔检查是比较费时费钱的, 特别是取芯样检查。根据80年代初我国钻孔灌注桩施工机械化的水平, 两个工班就可完成一根直径1.0m、长30m的灌注桩。而取芯检查则至少需时5~6d, 而且取芯检查的费用已接近一根桩的造价。所以这种方法只适用于有特殊需要的个别桩。

不取芯样检查留下来的钻孔, 必要时可用来供闭路电视法详细观察整个孔道周壁的混凝土情况。亦可供超声波法作孔壁内层混凝土质量的检查。

(三) 闭路电视检查法

利用闭路电视系统在地质钻孔中观察和鉴别岩层的岩性及地下水位, 在国内水利电力部门的工程地质勘察工作中实施较早, 并已有丰富的经验, 现已推广应用于基桩检验。采用此法时必须先在桩身中钻一工作孔, 供摄像探头深入桩身内部探视。所以电视法常配合不取芯样的勘探孔法进行。

目前使用的钻孔彩色电视系统由下列几部分组成, 见图1-2。

摄像探头3的外观是一个密封的圆柱形外壳。外径53~89mm, 应比钻孔略小。被密封在外壳里的整个机芯主要包括光学摄像系统、摄像管、照明系统、调焦伺服系统、转向伺服系统和方位指示器等, 它们全由一台控制器操纵。钻孔壁图像通过外壳上的密封玻璃窗口4及内部的一块45°反光镜11投向摄像镜头10。摄像探头由绞车1放落或提升。摄像探头在钻孔

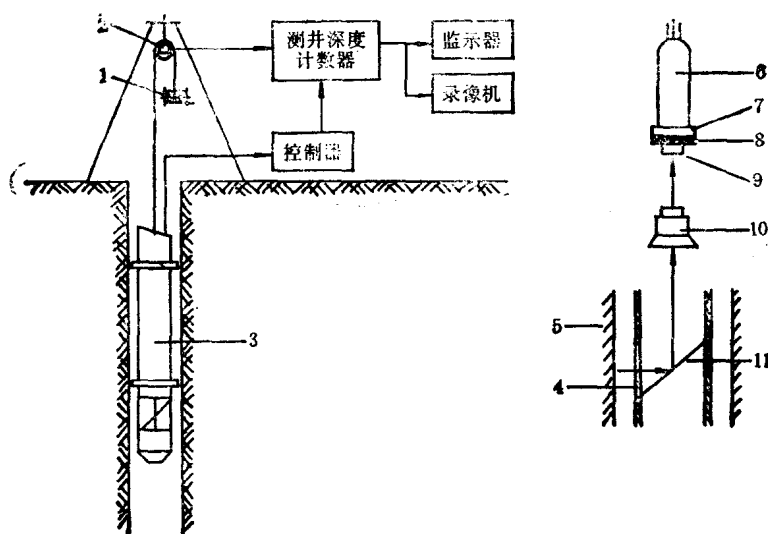


图1-2 钻孔电视系统

- 1-绞车；2-深度传感器；3-井下摄像探头；4-密封玻璃窗口；
5-孔壁；6-摄像管；7-靶；8-彩色条纹编码器；9-光学低通；
10-镜头；11-45°反光镜

中的位置由装在转向滑轮上的深度传感器6将深度信号送到深度计数器并形成数字视频信号。在那里和彩色全电视信号叠加后一起送监视器，将孔壁图像包括深度和方位一并显示出来并供录像。

借助于转向和调焦伺服系统，检查视野可达360°，并能保证图像清晰，甚至可以看清桩身断裂缝中的渗水，遇到孔壁上感兴趣的部位，可在监视屏上作详细研究。一些明显或典型的缺陷，可以拍下图片留作资料保存，亦可连续录像并加解说词，供日后培训技术人员作教学资料。

早期的摄像探头防水性能较差，只适用于干孔检查。若遇钻孔穿底或桩身断裂渗水而造成孔中积水，则必须将水抽干或用压缩空气将水压出，工序显得复杂。现代的摄像探头防水性能可靠，能适应20m以上的水头压力。若遇水质浑浊，影响成像清晰度，可以在钻孔终孔后用清水洗孔或投放明矾使水澄清。

二、辐射能检测法

辐射能检测法有两种：一是利用超声脉冲的声能在混凝土介质中的传播速度和能量衰减等参数随介质密度而变化的原理来评价混凝土的质量；二是利用放射性同位素释放出来的高能 γ —射线在混凝土介质中穿透时，由于混凝土质量的差异而产生不同的辐射效应来检验桩身的完整性和均匀性。这两种方法都需要在桩身中设置检查孔道，即预埋管道或钻工作孔。

超声脉冲法在国内应用已较普遍，郑州黄河大桥直径2.2m、长60m的钻孔灌注桩主要依靠超声脉冲法检验桩身质量。放射性同位素法在国内应用尚少。除因 γ —射线在混凝土中穿透能力有限，必须使用较大剂量同位素外，主要原因是非核专业操作人员常产生不安全感。但可以预料，随着核辐射知识的日益普及和核能在其他工程领域应用的日益广泛（如土工核

子密度仪等), 只要具备一定的防护知识和严格按规程操作, 核能技术并非没有可能在 国内 桩检技术中发挥其应有的作用。

在第三章和第四章中将分别叙述这两种方法。

三、静载试验法

无可否认, 桩的静载试验, 只要它是完全遵照试桩规范实施的, 那么, 它仍然是目前确定单桩承载力的最可靠方法。因此现行地基基础规范一直维持: “单桩承载力宜通过现场静载试验确定, 在同一条件下的试桩数量不宜少于总桩数的1%, 并不少于3根”的规定。正如前述, 静载试验方法的不足之处, 一是从统计分析的观点看, 1%的试桩样本数据, 绝对无法反映其他99%工程桩的基本情况; 二是随着桩径桩长的增大, 静载试验不论从其实施规模、消耗资金和需要时间来看, 均已接近难以接受的程度。尽管如此, 目前处于发展中的各种动力检测法也仍然需要用静载试验结果作对比来验证和考核它们的适用性和可靠性。因此, 可以预见, 至少在本世纪内, 静载试验仍将是检验承载力的主要方法。其他各种简捷的动力法作为补充。两者结合起来才有可能扩大受检桩的覆盖面。

关于静载试验的加载装置、试验程序等已有专书详细论述, 并有规范可遵照实施, 这些都早已为土建工程技术人员所熟悉, 这里不再赘述。仅在第二章中就将试桩静载试验结果分析中的有关问题作系统论述。

四、高应变动力检测法

用高应变动力法检验预制打入桩的极限承载力在国内外已有很长的历史。早期的动力打桩公式就是其代表。动力打桩公式是根据撞击理论和能量守恒原理推导所得。打桩时打桩锤所作的功应等于桩被贯入土中一定距离(称贯入度)所需的有效功和桩土体系所消耗的一切弹性的和非弹性的变形能之总和, 最后得出了极限荷载与贯入度的简单关系式。由于它的概念清晰, 公式型式简单, 测量贯入度也方便易行, 所以人们至今仍乐意采用它。通常根据设计要求的极限承载力代入打桩公式计算出相应的贯入度作为打桩最后阶段应该达到的控制贯入度。一旦打桩最后十锤的平均贯入度达到或小于控制贯入度, 即认为桩的承载力已满足设计要求。于是动力打桩公式就成为在打桩过程中起监控作用的重要措施。

显而易见, 动力打桩公式的适用条件是桩锤的冲击能量足以使桩尖克服土的弹性抗力而使土产生一定的永久变形。它与其他各种仅仅使桩周土发生弹性范围内的微幅振动的动力法不同。前者属于“高应变”动力法, 而后者属于“低应变”动力法。

(一) CASE法和CAPWAP法概要

作为早期动力打桩公式的延伸和发展的结果, 就是现代的以波动理论为基础的高应变动力检测法, 如CASE法(Case Institute of Technology)及其改进的CAPWAP法(Case Pile Wave Analysis Program)和相应的各种打桩分析仪PDA(Pile Driving Analyser)。它们借助于现代的振动测量和信号处理技术, 能在打桩过程中检测到桩头的受力和运动响应的信息; 借助计算机分析技术, 能较全面地考虑桩和土及其相互作用的各种因素; 通过复杂的运算, 可以获得桩的承载力。

以CAPWAP法为例, 大致的测试和分析过程是这样的: 在桩头两侧距桩顶面1~3倍桩径范围内对称地安装两只应变传感器和两只加速度传感器。桩顶的受力值(由应变测量结果得

出)和桩顶的运动量(由加速度测量结果经积分后得出)均可作为波动方程计算中的初始值。然后再将假设的土的静阻力(R_s)、最大弹性位移(S)以及阻尼值(C)作为输入值并开始运算。通过计算可以得到桩顶端的桩单元力和土阻力与时间的关系曲线。在一般情况下,计算得出的桩顶受力与时间的关系曲线和测量得到的不会完全吻合。因此必须调整土阻力(R_s)并反复迭代,务使计算得出的结果与测量所得到的相接近。当两者的吻合程度无法再提高时即可终止。此时的各项参数可认为是最佳估计值。最后得出的土静阻力(R_s)与位移的关系曲线就可用以估计桩的静承载力。

CASE法CAPWAP法主要适用于桩身材料和尺寸基本均匀的预制打入桩,因为锤击设备是现成的,并能提供足够的冲击能。钻孔灌注桩桩身表面不平整,配筋率很低,无法承受高能量的锤击力,所以一般不适宜于灌注桩。若有必要在较小直径灌注桩上应用高应变动力检测时,必须在桩顶上另加接一段高强度钢筋混凝土桩头。

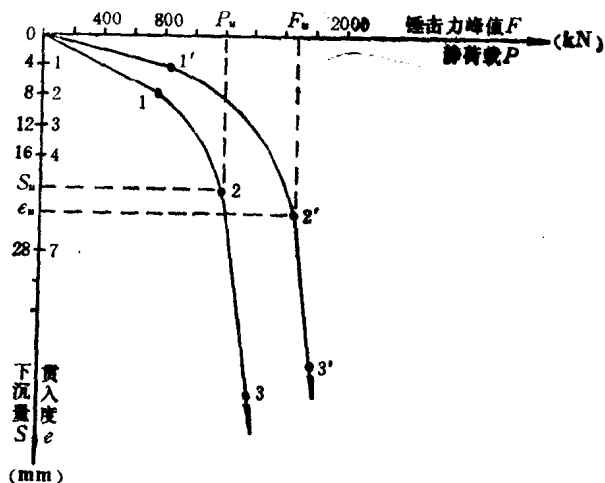


图1-3 锤击贯入试验 $F-e$ 曲线与 $P-S$ 曲线的比较

图中0~1、0~1'为直线段,1~2、1'~2'为过渡段,2~3、2'~3'为陡降段。

(二) 锤击贯入法

国内70年代后期提出了另一种高应变动力检测法——锤击贯入法。此法仿照桩的静载试验能得到 $P-S$ 曲线那样,对试桩用锤击方法分级施加冲击荷载(一定的锤重和不同的落距)。用一应变式力传感器测得各级冲击荷载的峰值 F ,同时测量出各级冲击荷载下桩的累计贯入度 e (由对称布置的两只百分表读出)。从而可绘制一条类似于静力试验 $P-S$ 曲线的动力试验 $F-e$ 曲线,如图1-3所示。

这两条曲线具有下列特征:

1. 一般情况下都有变形三阶段的形态。因此可以仿照在 $P-S$ 曲线上确定静极限荷载 P_u 的方法(通常取第二拐点对应的荷载)在 $F-e$ 曲线上确定相应的动极限荷载 F_u 。

2. 两条曲线线形相似,可以认为两者是可比的,而且在相同条件下, P_u 和 F_u 之间明显地存在着一定的相关关系。因此,可取:

$$\frac{F_u}{P_u} = C_u \quad (1-1)$$

$$\frac{e_u}{S_u} = A_u \quad (1-2)$$

e_u 和 S_u 分别是对应于动极限荷载 F_u 和静极限荷载 P_u 的累计贯入度和沉降量。 C_u 和 A_u 是两个比例系数,可通过大量试桩的动、静对比试验得到。根据资料报导,预制桩(250mm×250mm~400mm×400mm)和钻孔灌注桩(φ300mm~φ400mm)的 $C_u=1.25\sim2.0$; $A_u=0.24\sim0.28$ 。

于是,用锤击贯入法确定单桩静极限承载力的方法和步骤为:首先用前述测试方法得到一条 $F-e$ 曲线;若 $F-e$ 曲线显示良好的“三阶段”特性,则取对应于第二拐点的冲击荷载峰值为动极限荷载 F_u ,按公式(1-1)计算静极限荷载 P_u ;若 $F-e$ 曲线上没有明显的第二拐点,

则可取地基基础设计规范中规定的容许沉降量作为 S_u ，由公式(1-2)计算得 e_u 。然后在 $F-e$ 曲线上确定与 e_u 值对应的动极限荷载 F_u 。最后按公式(1-3)和(1-4)即可得到静极限荷载 P'_u 及其相应的沉降量 S'_u 。

$$P'_u = \frac{F_u}{C_u K_u} \quad (1-3)$$

$$S'_u = \frac{e_u}{A_u} \quad (1-4)$$

公式(1-3)中引入的 K_u 称为 C_u 的安全保证系数，一般可取 $K_u=1.0\sim1.2$ 。

锤击贯入法的原理、设备和测试分析工作都比较简单，因此其应用比CASE法更为广泛。一般亦都用于预制打入桩。研究资料指出：若用于灌注桩，则仅限于桩径 $\phi 300\text{mm}\sim 400\text{mm}$ ，桩长10m以内的小尺寸桩，而且桩头亦必须经过加强处理。方法是将桩头整平后用比桩身混凝土标号高1~2级的早强快干混凝土或环氧树脂水泥砂浆加固，使能耐受较大的冲击荷载。

五、低应变动力检测法

属于低应变动力检测的方法有多种，它们的特点是激振能量较小，桩—土系统的振动仅限于弹性范围以内的微幅振动，且设备轻巧，携带方便。因此国内应用已十分普遍。针对灌注桩在施工中易使桩身出现各种缺陷的特点，多数低应变动力法主要用来检测桩身完整性，或兼有评定桩承载力的功能。个别方法则以检验承载力为主。

低应变动力法中，按其対桩顶施加的激励力的作用规律(作用力与时间的关系)可划分为瞬态激励法、稳态激励法和随机激励法三大类。

在瞬态激励法中，有以激励波(应力波)在竖杆中的传播理论为基础的“应力波反射法”(见第五章)；有用一集总参数单自由度系统模拟桩—土体系为基础的“频率法”和“频率—初速法”(见第六章)，这些方法常统称为“锤击法”；有以人工地震(在地下钻孔中放炮)为震源，利用震波在桩身表面的折射特性为基础的“人工地震竖向折射波速法”(见第五章)；有利用水电效应激发起较大脉冲激振力为其特点的“水电效应法”(见第七章)；有以机械阻抗分析原理为基础的“瞬态机械阻抗法”(见第八章)。

近年来，除上述瞬态激励法外，已开始研究采用火箭激励。将一枚小型火箭(直径约50mm，长约330mm，壁厚约7mm的钢管，内装填黑色火药)置于桩顶面，点爆后，根据喷气推动原理产生的后座力就是作用于桩上的激振力。它是一个矩形脉冲力，脉冲的幅值(激振力大小)和脉冲宽度(激振力持续时间)均可由设计用药量等火箭参数控制。在低应变动力法中，可选用较小力幅和较短脉宽，仅使桩—土系统发生微幅振动；在高应变动力法中，可设计成较大的不同力幅的多个火箭，脉宽亦较长，以便在不同力幅的脉冲力作用下测量桩的贯入度，分析力和贯入度的非线性关系。

根据机械阻抗理论，研究一个系统的动力特性，与所施加的激励量及其响应量的性质无关。所以，用“机械阻抗”法测桩就有三种激励方法可供选择，即瞬态激励、稳态激励和随机激励。这三种不同激励的机械阻抗法将一并在第八章中详细介绍。

80年代后期，国内提出了“共振法”。此法所采用的激励方法和测试结果的数据类型，均与机械阻抗法中的稳态激励并测量导纳函数基本相同。其特点主要是能考虑承台质量和用一阶共振频率求算桩—土系统的刚度参数；并根据建筑物容许沉降量 $[S]$ 估算承载力。已将它列入第八章机械阻抗中一并介绍。