

桩动力检验的理论 与实用方法

黄龙生 黄 勇 编著

地震出版社

桩动力检验的理论实用方法

黄龙生 黄 勇 编著

地震出版社

图书在版编目(CIP)数据

桩动力检验的理论与实用方法/黄龙生、黄勇编著. —北京:地震出版社, 2004.3

ISBN 7-5028-2421-9

I. 桩… II. ①黄… ②黄… III. 桩基础—构造动力学—检验 IV. TU473.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 006694 号

地震版 XT200400003

内 容 简 介

本书作者根据多年的工作实践,系统地介绍和评述了各种桩动力检验的方法,探讨了其理论根据及应用范围,并提出了自己的检验新方法。全书共分五章。书中的理论演绎及对工程现象的解释,有助于工程技术人员学习和运用。

本书可供土建科技人员及建筑工程质量检测人员参考,也可供高等院校土建工程专业的师生学习、参考。

桩动力检验的理论与实用方法

黄龙生 黄 勇 编著

责任编辑:蒋乃芳

责任校对:张晓梅

出版发行:地震出版社

北京民族学院南路9号

邮编:100081

发行部:68423031 68467993

传真:88421706

门市部:68467991

传真:68467972

总编室:68462709 68423029

传真:68467972

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

经销:全国各地新华书店

印刷:北京地大彩印厂

版(印)次:2004年3月第一版 2004年3月第一次印刷

开本:787×1092 1/16

字数:173千字

印张:6.75

印数:0001~1000

书号:ISBN 7-5028-2421-9/TU·171(3025)

定价:20.00元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题,本社负责调换)

前 言

桩基础是建筑物的重要组成部分。合理、有效地检验桩质量及其承载能力是保证工程建设安全的措施之一。当前检验的方法除静载试验以外,要数动力检验方法的应用最为广泛,因为它简单、方便、实用、经济,适应经济建设的需要。

我国从20世纪70年代起,各式各样的桩动力检验方法迅速发展起来,不同的试验技术和学术观点在实践中纷纷亮相,并常常出现争议。实际上,任何理论和技术都会经历磨合、改进、充实、提高、完善的发展过程,在这一过程中,理论及技术一般都不很成熟,出现不同观点的争议是很正常的。我们曾有多年的实践工作经验,对桩动力检验方法的一些理论分析及试验技术也有自己的体会和看法。本书正是依据自己的实践经验,系统介绍和评述现有各种桩动力检验方法的特点和存在的问题,指出探讨实用、有效的桩动力检验方法所应遵循的正确途径,并据此提出自己的检验新方法。作者尽力使书中理论演绎及对工程问题的解释通俗易懂,以便于读者学习、掌握和应用。

中国地震局工程力学研究所王孝信、薄景山、江近仁、杨学山、陈懋恭等研究员审阅了书稿并提出了宝贵建议,黄万春、黄泉生等副研究员及高级工程师对书稿进行了有益的讨论,给予了热心支持。其中黄万春高级工程师还是我们实践工作中的密切合作者。在此,对他们表示衷心的感谢!

作者感谢中国地震局震灾防御司的资助,使本书得以顺利出版。

书中不妥或错误之处,敬请读者批评指正。

作者

2003年7月

目 录

第一章 绪论	(1)
第二章 桩的构造及施工工艺	(3)
第一节 混凝土桩的设置及构造	(3)
第二节 成桩方法	(5)
第三节 桩质量可能出现的隐患	(8)
第三章 桩质量的判别	(10)
第一节 波动分析	(10)
第二节 振动分析	(20)
第三节 声波探伤	(23)
第四节 类比识别	(27)
第四章 单桩承载力的确定	(33)
第一节 静载试验确定单桩承载力	(33)
一、加载装置	(33)
二、加载方式	(35)
三、极限承载力的确定	(35)
第二节 微幅振动试验确定单桩承载力	(36)
一、频率法	(36)
二、频率-初速法	(38)
三、共振法	(41)
四、机械阻抗法	(47)
五、微幅振动试验分析的理论依据及适用范围探讨	(48)
六、脉冲位移法	(51)
第三节 强力贯入试验确定单桩承载力	(66)
一、波动方程分析法	(66)
二、凯司法	(71)
三、 $Q_d-\Sigma S_d$ 曲线法	(77)
四、经验公式法	(78)
五、静动法	(78)

第五章 桩动测的试验方法及其仪器设备的选择	(80)
第一节 桩动测的试验方法	(80)
一、微幅振动试验	(80)
二、强力贯入试验	(83)
第二节 激振设备	(84)
第三节 测试仪器	(85)
一、信号采集	(86)
二、信息处理	(94)
三、识别诊断	(99)
第四节 动测试验方法小结	(99)
参考文献.....	(101)

第一章 绪 论

桩基工程在建设中的应用越来越广泛。它的作用在于将结构重量及所承受的荷载传至桩周围土壤及深部稳定的岩土层中,以增强基础的承载能力,减小结构的沉降。这一能力的大小取决于岩土对桩的支承阻力和桩身的强度。一般来说,对于多数的桩,前者是控制因素;对于端承桩、超长桩、有缺陷的桩,后者则可能是控制因素。因此,为了工程建设的安全,必须认真检验桩基工程的质量及其承载能力。检验的方法应当能够如实地反映整个桩基工程的实际工作状态。实际上,由于桩基工程的工作状态复杂,受多种因素的影响,通常仅选择一个单桩作为样本,检验当时的实际状态,其它影响因素,如群桩效应、特殊土质条件等,在设计计算中另行考虑。当前就单桩试验样本来说,静载试验的方法最接近于桩的实际工作条件,因而是最可信的。问题是静载试验所需设备笨重,费时、费力、费钱,单桩试验样本数量不可能多,这对于评价母体的承载能力必然存在某种局限性。因此,如何选择一种既有一定的可靠性,又简便、经济的检验方法以替代或弥补静载试验的不足,就成为人们关注的课题。目前有关这方面的探讨,以动力检验方法最为活跃和广泛,因为它简单、方便、实用、经济,适应经济建设发展的需要。

所谓动力检验,实际上是依据桩的动态反应传输出来的信息,分析、判别桩质量及桩承载能力的一种方法。当前在动力检验方法中由于激振方式、参数拾取及分析途径的差异,有各种各样的称呼,如敲击法、水电效应法、机械阻抗法、共振法、频率法、频率-初速法、打桩法、锤贯法、火箭激振法、凯司(Case)法、实测曲线拟合法等等,其实,概括起来,在激振方式上,各种方法仅仅是作用能量引发桩位移大小的差异。如果以激发桩产生位移的量级分类,可以简单地归纳为两类,一是桩在原位振动,不下沉,振幅为微米量级;另一是桩下沉,位移达毫米量级。但是,为了桩基工程的安全,不管是哪一类型的激振方式,都不容许桩身出现大的应变。确切地说,前者可称为微幅振动试验,后者宜称为强力贯入试验。在计算分析上,除经验判断外,各式各样的激振试验都基于线弹性理论,建立假想计算模型,从桩的动态特征演析体系的物理参数,确定桩质量及其承载能力。

桩动力检验方法的研究,初期以经验探索为主,如今理论分析逐渐增多。王靖涛(1999)、雷林源(2000)、王雪峰和吴世明(2001)等通过建立桩土体系的固定模型,依据振动理论或波动理论,运用复杂的数学运算,对桩土体系的振动状态、波的三维效应、弥散效应等作了详细的论述。无疑地,这些理论分析,对于探讨桩的真实工作状态很有帮助。问题是,作为细长杆件的桩,材质一般属于非匀质体,支托它的岩土,本构关系又很复杂,存在着诸多模糊和不确定的因素,单纯依据理论分析,并不一定能完善地解释一切现象。例如:

(1) 桩在动力的击打下,桩土共同工作体系的范围是不确定的。锤击力大,桩土共同工作体系的范围大;锤击力小,桩土共同工作体系的范围小。换句话说,在大小不同的锤击力作用下,桩土共同工作体系的模型边界是不固定的,质量及刚度分布是不同的,波动或振动响应特征是变化的,也就是说动态模型并非固定不变。

(2) 桩基工程中,若施工不严格遵守操作规程,常可能出现种种隐患,例如缩颈、扩颈、混凝土离析、浮浆夹层、断裂、夹泥、空洞、沉渣等,不同缺陷性质的出现又与成桩工艺、施工状况、地质条件等有关。对于这种多样性、多元化的缺陷性质,仅凭理论分析,恐难得到满意的解释。

(3) 一般桩基工程,主要承受静态力的作用,其破坏形式受多种因素的影响而形态多样,极限状态的解释不一。各国规范往往根据各自的国情,沿用与桩基实际工作状态最为接近的静载试验,按规定的试验程序所获得的结果作为桩的实际承载能力。桩动力检验方法中,桩承受动力的击打,受力状态与桩的实际工作状态不同,也就是说,桩动力检验方法只是一种间接的判断方法,任何动态理论分析的结果都必须以规范规定所确定的承载力作为标准来校核、修正或等效。实际上,规范中桩承载能力的规定,本来就是人为制订的,并非是纯理论的产物,作为间接判断的动力检验方法,要获得与规范规定标准相同的结果,自然也不可能是纯理论所能解决的。

事实上,目前各类动力检验方法,不管标以什么理论的分析,要想准确地评估桩质量及其承载能力,还离不开工程经验和试验研究的分析,而且使用范围需受一定条件的约束。例如,依据波在桩中的传播特征或频域,可以分析桩阻抗或频域的变化规律、评估桩质量,至于缺陷性质,则往往需借助于相似缺陷桩的波反映规律或工程经验予以判断。对于桩承载力的确定,由于动态力及静态力作用下桩的工作状态不同,任何动态的理论分析结果要想与规范规定的静载试验结果取得一致,都必须通过动静试验对比的分析,寻求修正动态分析结果的等效系数或修正系数,并将这些系数用于试桩动态分析结果的校正。由于桩土共同工作体系的复杂性,桩承载能力受多种因素的影响。一般来说,动静对比试验应在同一根桩上以同一试验方式和激振力的动力试验与规范规定程序的静载试验作对比分析,以获取等效系数或修正系数,而且这一系数仅适用于与动静对比试验桩保持静态相似性和动态相似性的试桩分析。实践证明,任何动力检验方法的分析结果,凡是符合上述对比试验原则及应用约束条件,都将获得良好的结果;反之,违背或偏离上述对比试验原则及应用约束条件,都将出现偏差或错误。换句话说,建立在理论分析与工程实践相结合的基础上的研究,是探讨实用桩动力检验方法的正确途径。

第二章 桩的构造及施工工艺

由于桩土共同工作体系的复杂性,准确地判别桩质量及其承载能力,还需借助于工程经验的辅助,即依赖于试验者对桩的构造、成桩方法、施工状况的全面了解和评估。

第一节 混凝土桩的设置及构造

桩基工程中以混凝土桩,如钢筋混凝土预制桩、预应力混凝土桩、混凝土灌注桩等的应用最为普遍。它的设计通常必须综合考虑结构荷载、使用要求、地质条件、施工技术、施工环境等,以决定适当的桩型、桩径、桩长、桩距和群桩形式。

一般来说,在竖向荷载作用下,荷载主要由桩侧阻力和桩端阻力来承担。当桩穿透不同土层及深度,对应于桩达到最大承载能力或整体失稳或发生不适于继续承载的变形等状态时,桩的受力状况是不同的。桩端无较硬的土层或长径比 l/d 很大,传递到桩端的轴力很小,桩顶荷载由桩侧阻力承受的桩称为摩擦桩;桩端有较坚硬的粘性土、粉土和砂类土,具有一定的桩端阻力,但桩顶荷载主要由桩侧阻力承受的桩称为端承摩擦桩;桩长径比 l/d 较小,桩穿越软弱土层,桩侧阻力可略,桩顶荷载由桩端阻力承受的桩称为端承桩;桩穿越土层,具有一定的侧阻力,但桩顶荷载主要由桩端阻力承受的桩称为摩擦端承桩。

就成桩工艺而言,挖、钻成孔灌注混凝土,不产生挤土作用的为非挤土桩;强行打入桩或击入沉管灌注混凝土,对土产生挤压作用的为挤土桩;先预钻孔,后打入桩或击入沉管灌注混凝土,起到部分挤土作用的为部分挤土桩。

就桩径大小而言,桩径小于或等于 250 mm 的属小桩,桩径大于或等于 800 mm 属大桩,介于两者之间属中桩。

根据混凝土桩的制造,有灌注桩和预制桩两类。

(1) 灌注桩是就地灌注混凝土成桩,受力钢筋由计算确定。一般最小配筋率取 0.65% ~ 0.2%,小桩取高值,大桩取低值。抗压桩主筋不应小于 $6\phi 10$,沿桩周均匀布置,净距 ≥ 60 mm,尽量减小钢筋接头。箍筋采用 $\phi 6 \sim \phi 8$,间距 200 ~ 300 mm,宜采用螺旋式箍筋,当主钢筋长度超过 4 m,应每隔 2 m 左右设一道 $\phi 12 \sim \phi 18$ 焊接加劲箍筋。

端承桩、承受负摩擦的桩、位于坡地岸边的基桩宜通长配筋。桩长较大的摩擦桩通长配筋并非受力所需,且不便施工,可沿深度降低配筋率,实行分段配筋。

灌注桩混凝土强度等级 $\geq C15$,水下灌注的混凝土强度等级 $\geq C20$ 。混凝土保护层厚度 ≥ 35 mm,水下灌注的混凝土保护层厚度 ≥ 50 mm。

(2) 预制桩是在工厂或现场预制成桩,配筋应按吊运、打桩、桩的受力条件计算。

混凝土预制桩，截面直径或边长 $\geq 200\text{ mm}$ ，最小配筋率 $\geq 0.8\%$ ，主筋 $\geq \phi 14$ ，桩顶 $(2\sim 3)d$ (桩径) 范围内箍筋应加密，并设置钢筋网片，混凝土强度等级 $\geq \text{C}30$ ，混凝土保护层厚度 $\geq 30\text{ mm}$ ，长度接头个数 ≤ 2 个。

预应力混凝土预制桩，截面直径或边长 $\geq 350\text{ mm}$ ，预应力混凝土离心管桩外径 $\geq 300\text{ mm}$ ，预加应力一般采用先张法，可以采用冷拉Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级钢筋，混凝土强度等级 $\geq \text{C}40$ ，混凝土保护层厚度 $\geq 30\text{ mm}$ ，长度接头个数 ≤ 4 个。

桩端持力层一般宜在较硬土层上，并应嵌入一定深度以增大桩端阻力，但桩端嵌入超过一定深度后，桩端阻力就不再明显增大。因此，为了充分发挥桩的承载力，根据试验研究，桩端嵌入持力层的适宜深度，对于砂与碎石类土为 $(3\sim 10)d$ (桩径)，随着土密度的提高，适宜深度增大；对于粉土、粘性土为 $(2\sim 6)d$ ，随着土的孔隙比和液化指数的减小，适宜深度增大。不过，考虑到成桩的可能性，《建筑桩基技术规范(JGJ94 — 94)》规定，桩端全断面进入持力层的深度，粘性土、粉土 $\geq 2d$ ，砂土 $\geq 1.5d$ ，碎石土 $\geq 1d$ 。当施工条件许可时，桩端全断面进入持力层宜达试验研究所提出的适宜深度。如果桩端持力层下有软弱土层，为防止桩整体失稳，桩端下较硬持力层的深度不宜小于 $4d$ 。

对于群桩的布置，宜使桩群承载力的合力点与长期荷载的重心重合，并使受水平力和合力矩较大的方向有较大的截面模量。为了防止可能出现的不均匀沉降，在同一结构单元宜采用同一类型的桩。

为了尽量避免施工可能引起土的松弛效应或挤土效应对相邻桩的影响，根据土类和成桩工艺及排列状况，规定桩的最小中心距(表 2.1.1)。

表 2.1.1 桩的最小中心距

土类与成桩工艺		排数不少于 3 排且桩数不少于 9 根的摩擦桩	其它情况
非挤土和部分挤土灌注桩		$3.0d$	$2.5d$
挤土灌注桩	穿越非饱和土	$3.5d$	$3.0d$
	穿越饱和软土	$4.0d$	$3.5d$
挤土预制桩		$3.5d$	$3.0d$
打入或敞口管桩和 H 型钢桩		$3.5d$	$3.0d$

注：d 为圆桩直径或桩边长。

对于扩底桩，为了保证桩侧阻力得到有效发挥，且避免扩大端相串，对扩底端的最小中心距也作了相应规定，如表 2.1.2 所示。

表 2.1.2 灌注桩扩底端最小中心距

成桩方法	最小中心距
钻、挖孔灌注桩	$1.5D$ 或 $D+1\text{m}$ (当 $D>2\text{ m}$)
沉管夯扩灌注桩	$2.0D$

注：D 为扩大端设计直径。

在承台与桩的连接部位,由于整体性和强度相对较低,而且桩上部是承受可能出现水平力的关键部位,即使计算无需设置受力钢筋,一般仍需配置适量的构造钢筋。构造钢筋应加深至上部软弱土层的底部,具体规定如下:

一级建筑桩基,即重要的或对桩基变形有特殊要求的工业与民用建筑物,应配置桩顶与承台的连接钢筋笼,主筋采用6~10根 $\phi 12 \sim \phi 14$,配筋率 $\geq 0.2\%$,入承台 $30d$ (主筋直径),入桩身 $\geq 10D$ (桩径),且不小于承台下软弱土层层底高度。

二级建筑桩基,即一般工业与民用建筑物,连接钢筋4~8根 $\phi 10 \sim \phi 12$,入承台 $\geq 30d$ (主筋直径),入桩身 $\geq 5D$ (桩径);沉管灌注桩不应小于承台软弱土层层底深度。

三级建筑桩基,即次要建筑物可不配构造筋。

第二节 成桩方法

随着科学技术的进步,为适应工程建设对钢筋混凝土桩型的不同需求,桩的施工工艺也在不断创新、发展。

当前常用的成桩方法有:

1. 泥浆护壁成孔灌注桩

成孔机具的选择应根据桩型、钻孔深度、土层情况等条件综合考虑。

潜水钻适用于粘性土、淤泥、粉土、砂土、碎石土、强风化岩层及软质岩。冲击钻能穿透各类土层,钻入基岩。

施工时孔口应埋设厚4~8mm钢板护筒定位,保护孔口。对于潜水钻,护筒直径应比钻头直径大10cm以上;对于冲击钻,护筒直径应比钻头直径大20~40cm,以便于钻头的提升。护筒埋置应牢固密实,对于砂土,埋深 ≥ 1.5 m,对于粘土,埋深 ≥ 1 m,露出地面0.4~0.6m。护筒与坑壁间用粘土填塞,分层夯实。护筒上设1~2个溢浆孔,便于溢出泥浆,回流泥浆池。

钻头依据土质条件选择,开钻时注入泥浆,使不同土层中的空隙渗填密实,渗漏水达最低限度,同时护筒内的泥浆面应高出地下水位1.0m以上。受水位涨落影响时,泥浆面应高出水位1.5m以上,使孔内保持一定水位,稳定孔壁,防止塌孔。对于潜水钻,一般钻进粘性土、淤泥质土、砂土等宜用笼式钻头,穿过砂夹卵石层、强风化岩层宜用镶焊硬质合金刀头的笼式钻头,遇孤石或旧基础时宜用带硬质合金齿的筒式钻头。钻进速度依据土层类别、钻孔深度、供水量而定。通常,淤泥质土钻进速度 ≤ 1 m/min,其它情况以钻机不产生跳动及不超负荷为限。注入泥浆的比重应控制在1.1~1.5,泥浆过稠会影响钻进速度,过稀则不利于护壁、排渣。在粘土和亚粘土层中可注入清水,以原土造浆,排出的泥浆比重宜为1.2~1.4,对土质较差易塌孔土层,排出泥浆比重可适当增大。对于冲击钻,钻头形式有十字形、工字形、人字形等,一般宜用十字形钻头,低锤勤击、勤冲、勤掏渣,并保证泥浆补给,保持孔内浆面稳定。土质较差的土层宜用1m左右的小冲程,泥浆比重1.2~1.4;粘土层宜用1~2m冲程,注入清水原土造浆,泥浆比重1.2~1.4;粉砂或中粗砂层用1~2m冲程,泥浆比重1.3~1.5;砂卵石层用2~3m冲程,泥浆比重1.3~1.5;基岩用3~4m冲程,泥浆比重1.3左右;遇孤石用高冲程或高低冲程交替冲击,以击碎孤石。不过,高冲程冲击能量大,

易扰动孔壁,引起塌孔,不宜多用。

钻大孔可分二次成孔,第一次钻孔直径约为成孔直径的0.6~0.8倍,第二次钻至成孔直径。

钻至设计深度应进行清孔,对土质较好的土层可用空气吸泥机清孔或用压缩空气喷翻泥浆,注入清水稀释,使泥浆夹着沉渣排出;对孔壁土质差的情况,宜用泥浆循环清孔或抽渣筒排渣,直至排出的泥浆比重控制在1.15~1.25为止。残留的沉渣厚度,端承桩 ≤ 50 mm,摩擦端承桩、端承摩擦桩 ≤ 100 mm,摩擦桩 ≤ 300 mm。

清孔完毕,应立即安置钢筋笼,进行水下混凝土灌注。水下混凝土必须具备良好的和易性,坍落度宜为180~220 mm,含砂率为40%~45%,细骨料尽量用河卵石,也可用碎石,但粒径应 < 40 mm,水泥用量 ≥ 360 kg/m³。

灌注混凝土用的导管壁厚 ≥ 3 mm,直径为200~250 mm,底管长度 ≥ 4 m,接头宜用法兰或双螺纹方扣快速接头,但最下端一节的底部应焊设加强箍。使用隔水栓应有良好的隔水性能,一般宜用预制混凝土球塞。为使隔水栓顺利排出,开始灌注混凝土时,导管底部至孔底的距离宜为300~500 mm,桩径小于600 mm时,可适当加大导管底部至孔底距离,排塞后不得将导管插回孔底。

贮斗内混凝土的初存量,必须满足首次灌注时导管底端能埋入混凝土中0.8~1.2 m。随着混凝土的上升;要提升和拆卸导管,导管底端应保持2~6 m,并不能小于1 m,严禁把导管提出混凝土面。混凝土灌注应连续进行,每根桩的浇注时间按初盘混凝土的初凝时间控制。凿除桩顶浮浆厚度后要能保证桩顶的设计标高及混凝土质量。

2. 沉管灌注桩

沉管灌注桩有振动沉管灌注桩及锤击沉管灌注桩两种,桩头可采用预制钢筋混凝土桩靴或活瓣桩靴。钢管沉入土中,达设计要求的贯入度或标高后,应立即浇灌混凝土,边振边拔出钢管成桩。沉管灌注桩适用于一般粘性土、淤泥质土、砂土和人工填土、稍密及中密的碎石土。

施工时,根据土质情况和荷载要求,可分别选用单打法、反插法、复打法。

(1) 振动沉管灌注桩的施工程序如下:

① 单打法,灌注混凝土,先振动5~10 s,再开始拔管,对于一般土层,拔管速度1.2~1.5 m/min,较弱土层拔管速度 $\leq 0.6\sim 0.8$ m/min,每拔0.5~1.0 m停拔振动5~10 s,如此反复进行直至钢管拔出。一般桩径比沉管径约大30%,适用于含水量较小的土层。

② 反插法,灌注混凝土后,先振动再拔管,沉管每拔出0.5~1.0 m,便向下反插0.3~0.5 m,在振动中如此反复进行;桩尖部位约1.5 m范围内宜多次反插,以扩大桩端截面。拔管过程中,应分段添加混凝土,管内混凝土应始终不低于地面或高于地下水位1~1.5 m以上。拔管速度 ≤ 0.5 m/min,穿过淤泥夹层应放慢拔管速度,并减少拔管高度和反插深度。桩截面比沉管约大50%,适用于饱和土层,但在流动性淤泥中不宜使用。

③ 复打法,按单打法成桩后,于混凝土初凝前,在原桩位安放桩靴复打。由于沉管的冲击挤压,提高了混凝土密实度,扩大了桩径,桩径比沉管径约大80%,适用于饱和土层。

(2) 锤击沉管灌注桩的施工程序为,用落锤或蒸汽锤沉入桩管至设计要求深度,立即灌注混凝土。采用单打法、反插法或复打法的施工程序与振动沉管灌注桩相同。混凝土的坍落度宜为80~100 mm。每次混凝土尽量多灌,先灌至笼底标高,再放置钢筋笼。拔管高度应控

制在能容纳第二次所需灌入混凝土量为限。拔管速度应均匀,对一般土层 $<1\text{ m/min}$,对软弱土层及软硬土交界处应控制在 $0.3\sim0.8\text{ m/min}$ 内。采用倒打拔管的打击次数,单动汽锤 ≥ 50 次/分,自由落锤轻击(小落距锤击) ≥ 40 次/分。钢管未拔出前,倒打锤击不得中断。

应当注意,采用沉管灌注桩施工,当桩距小于3.5倍沉管外径时,应采取跳打法,待邻桩混凝土强度达50%~60%以上方可施工。

3. 干作业成孔灌注桩

干作业成孔灌注桩适用于地下水位以上的一般粘性土、砂土、人工填土。

根据地质条件、施工技术、经济因素等,选择下列适当的机械或人工成孔方法。

(1) 螺旋钻成孔,即利用全叶螺旋钻机切削土壤,使土沿螺旋钻杆上升而涌出孔外。钻杆及钻头的选择,依据土质条件而定。软塑土层含水量较大,可用叶片螺距较大的钻杆;可塑或硬塑的土层或含水量较小的砂土,可用较小螺距的钻杆,以便缓慢、均匀、平稳地钻孔;粘性土层宜用尖底钻头;硬土及冻土可选用钻头刃口上镶焊硬质合金刀头;松散土层宜用平底钻头;含有大量砖瓦块的杂填土宜用耙式钻头;含有混凝土块、条石等障碍物宜用筒式钻头。开钻时,钻杆应保持垂直,防止晃动,钻进速度根据电流值变化及时调整。扩底直径应根据电流值或油压值调节扩孔刀切削土量,防止超负荷。钻至规定深度时,要在原处空转清土,尔后停转提升钻杆。

(2) 机动洛阳铲挖孔,初始铲具提升高度以 $1\sim2\text{ m}$ 为宜,其后可增至 3 m 左右。挖干硬土层时可适当注水湿润便于挖掘;挖软土层时可适当投入干土或石灰;挖含砖瓦、石块的杂填土时可在铲具刃口内侧均匀焊上 $6\sim8$ 块小钢板,以利排土;遇孤石时可换用冲锤击碎。达设计要求深度后,清除孔底沉渣。

(3) 人工挖孔,孔径(不含护壁)不得小于 0.8 m ,排桩跳挖的最小施工净距不得小于 4.5 m ,孔深不宜大于 40 m 。先放线定位,边掘进,边筑混凝土护壁,混凝土护壁厚度 $\geq 10\text{ cm}$,上下节护壁宜用钢筋拉结,混凝土强度等级 $\geq$ 桩身混凝土强度等级。用电动葫芦或手动卷扬机吊桶运土,堆土应离孔口 1 m 以上。孔内用低压安全灯照明,并设应急软梯,深孔还要用小型鼓风机通过塑料管送风,并备有潜水泵抽取孔内积水。对于桩端扩大头部分,应采用逐渐变径方法,防止塌方。达设计深度后,清除孔底残渣、积水并封底。

干作业成孔检查验收后,放置钢筋笼,浇灌混凝土,混凝土坍落度宜为 $80\sim100\text{ mm}$,混凝土浇灌作业应连续进行,分层夯实,每层厚度 $\leq 1.5\text{ m}$ 。扩底桩灌注混凝土时,第一次应灌到扩底部位的顶面,振捣密实。

4. 混凝土预制桩

一般需将混凝土预制桩沉入地层至设计标高。沉桩方法有锤击法、振动法、水冲法、静压法。

(1) 锤击法,用于中密、稍松砂性土和塑性粘土。桩锤的选择,应根据地质条件、桩型、桩的密集程度、单桩竖向承载力及现有施工条件等决定,有自由落锤、柴油锤、蒸汽锤、液压锤等,一般最大锤击压应力不容许超过混凝土抗压强度的65%,尽量采用重锤低落,减少打桩应力,提高打桩效率。

(2) 振动法,用于砂性土、粘土、砂夹卵石层,是用偏心轮激振器产生振动力,把桩沉

入土中。

(3) 水冲法, 适用于砂土和碎石土, 是用内(外)射水法沉桩, 水冲至最后 1~2 m 时, 停止射水, 用锤击沉桩。

(4) 静压法, 适用于软弱土层, 是用桩架自重或配重当反力装置, 由电动油泵产生液压力, 将桩压入土中。

打桩顺序一般应自中间向两个方向或向四周对称施打, 当一侧毗邻建筑物时, 由毗邻建筑物向另一方向施打, 而且宜先打大桩后打小桩, 先打长桩后打短桩。为了减少沉桩挤土效应及地面震动对邻近建筑物的影响而采用预钻孔沉桩时, 预钻孔孔径应比桩径小 50~100 mm, 深度宜为桩长的 $1/3 \sim 1/2$, 然后用锤击沉桩; 也可限制打桩速率或开防震沟, 沟宽 0.5~0.8 m, 深度按土质情况以边坡能自立为准。当桩长不足, 需要接桩时, 连接方式可用焊接、法兰接及硫磺胶泥锚接。硫磺胶泥锚接桩适用于软土层。沉桩深度, 当桩端位于一般土层时, 以控制桩端设计标高为主, 贯入度为辅; 当桩端进入坚硬、硬塑的粘性土、中密以上粉土、砂土、碎石类土、风化岩时, 以贯入度控制为主, 桩端标高可作参考; 当贯入度达要求而桩端标高未达设计要求时, 应继续锤击 3 阵, 以每阵 10 击的贯入度不大于设计规定的数值(一般通过试桩确定)为准。

第三节 桩质量可能出现的隐患

施工中若不严格遵循操作规程, 桩可能存在缺陷, 出现隐患, 导致桩基工程事故的发生。由于成桩方法的不同, 桩易发生的隐患也不尽相同。不同桩的隐患如下:

(1) 泥浆护壁成孔灌注桩: 当土质松散, 泥浆护壁不良时, 易发生塌孔, 导致缩颈、扩颈、夹泥; 对水下浇灌混凝土, 施工欠妥或混凝土配合比不当或偷工减料, 则易发生混凝土离析、空洞、夹泥、断桩; 混凝土灌注过程中, 停歇时间过长, 易出现浮浆夹层、施工缝; 清孔不当, 沉渣厚, 桩端出现软垫层。

(2) 沉管灌注桩: 施工过程中周边土受到挤密会产生隆起、侧移; 当邻近桩混凝土处于初凝状态或桩距过小时, 会产生剪断或拉裂现象(通常发生在地面下 2~3 m 附近); 施工时拔管过快, 管壁可能将混凝土带起, 造成缩颈或断桩; 通过软土层或软硬交错的夹层时, 软土若挤入混凝土中会形成夹泥层或缩颈; 遇硬夹层、孤石、混凝土块或桩锤选择不当, 桩可能未达设计深度; 混凝土配合比欠妥或偷工减料, 混凝土常出现松散、离析; 桩尖被打碎、泥水涌入管内会形成泥水夹层; 拔管带起桩尖而后脱落或活瓣未及时打开, 可能形成桩尖空穴、悬空。

(3) 干作业成孔灌注桩: 无护壁时, 如果成孔停歇时间过长, 孔壁易发生失稳; 孔壁土质差, 灌注混凝土时, 若受扰动会发生坍塌; 孔底残渣过厚、混凝土配合比欠妥、灌注混凝土作业不连续, 可能出现缩颈、扩颈、夹泥层、施工缝、混凝土离析、桩端软垫层。人工挖孔桩, 位于地下水丰富, 渗流严重的土层时, 易发生崩塌, 造成缩颈、扩颈、夹泥等。有混凝土护壁时, 一般塌孔、残渣厚的现象不易发生, 但混凝土配合比或浇灌不当也会出现空洞、浮浆夹层、施工缝、混凝土离析等现象。

(4) 混凝土预制桩: 桩身在吊装或运输过程中可能发生断裂; 打桩不当、产生拉应力过

大会使混凝土拉裂，桩尖土质差，最大拉应力多数发生在 $(0.3 \sim 0.7)$ 桩长处，桩尖土质较硬，最大拉应力易出现在桩的上部；桩长细比过大或接桩时，表面未清理干净，连接铁件不平，间隙大或焊接不连续、焊缝不牢或螺旋未拧紧或连接强度不足等，上下节桩易产生松脱、错位、曲折、开裂；桩距过小，桩周土隆起，会使邻桩上抬而失去端承能力；桩混凝土强度低，易被击碎；持力层起伏变化大或遇孤石、混凝土块或桩锤选用不当，锤击偏心，都会造成桩歪斜、桩头或桩尖破损、沉桩达不到设计深度等。

应当指出，桩的缺陷和损伤对桩基工程事故的影响，取决于缺陷和损伤的严重程度及缺陷和损伤发生的部位。桩的内力分布通常是上大下小，因此桩顶部的缺陷和损伤要比底部的缺陷和损伤危害更大。

第三章 桩质量的判别

桩质量及完整性的判别, 主要根据弹性波形及频谱形式的变化。判别方法有波动分析、振动分析、声波探伤、类比识别等。

第一节 波动分析

一般来说, 桩身材料的刚度远大于桩周土的刚度, 桩截面 A 的尺寸远小于长度 L , 桩身形同长杆构件。根据波动理论, 杆受轴向荷载撞击时, 杆中所产生的位移波或应力波便会沿杆长传播, 当杆的性质发生突变时, 突变处便会出现反射和折射现象。通过入射波、反射波和折射波的关系, 便可分析杆性质发生突变的情况, 从而判别桩质量。

以等截面杆为例, 在轴向荷载撞击下, 杆中微元 dx 的受力状态如图 3.1.1, 由力的平衡条件得

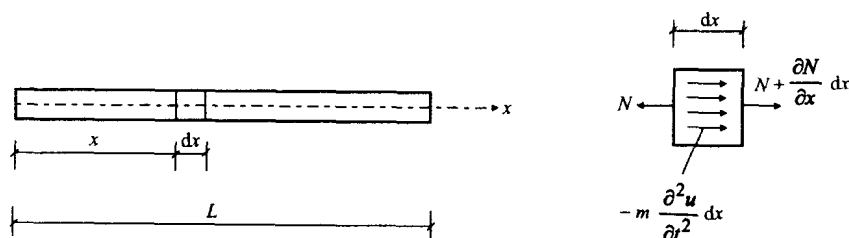


图 3.1.1 直杆的轴向振动

$$N = N + \frac{\partial N}{\partial x} dx - m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} dx$$

于是

$$m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial N}{\partial x}$$

轴力

$$N = \sigma A = E A \varepsilon = E A \frac{\partial u}{\partial x}$$

令

$$c^2 = \frac{E A}{m} = \frac{E}{\rho}$$

则

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (3.1.1)$$

式中, u —— 质点振动位移;

σ —— 应力;

ε —— 应变;

m —— 每单位长的质量;
 ρ —— 质量密度;
 E —— 材料弹性模量;
 c —— 波速。

式(3.1.1)即为一维波动方程。

将方程(3.1.1)作变量代换, 令

$$\begin{aligned}\xi &= x - ct \\ \eta &= x + ct\end{aligned}$$

复合函数的全导数为

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial x} &= \frac{\partial u}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial u}{\partial \eta} \\ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &= \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial u}{\partial \eta} \right) \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial u}{\partial \eta} \right) \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + 2 \frac{\partial^2 u}{\partial \xi \partial \eta} + \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2}\end{aligned}$$

同理

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} - 2 \frac{\partial^2 u}{\partial \xi \partial \eta} + \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} \right)$$

代入式(3.1.1)得

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \xi \partial \eta} = 0$$

设函数 $f_1(\xi)$ 及 $f_2(\eta)$ 都满足方程解, 则其任意的线性组合亦满足方程。因此, 式(3.1.1)解的一般形式为

$$u(x, t) = f_1(x - ct) + f_2(x + ct) \quad (3.1.2)$$

式中, f_1 及 f_2 为参数 $x - ct$ 及 $x + ct$ 的任意函数关系式。式(3.1.2)第一项 $f_1(x - ct)$ 在 0 时刻, 波的位置为 $f_1(x)$, 当经过 t 时刻, 波以速度 c 移至 x' , 波的新位置变量 $x' = x - ct$, $f_1(x - ct) = f_1(x')$, 形状不变(图 3.1.2), 于是, 波在 t 时刻沿 x 轴正向前进了距离 ct 。同理, 式(3.1.2)的第二项 $f_2(x + ct)$ 表示波沿 x 轴的负向传播。因此, 式(3.1.2)是反映由端部边界条件引起沿正负方向传播的两个特定波形(图 3.1.3)。

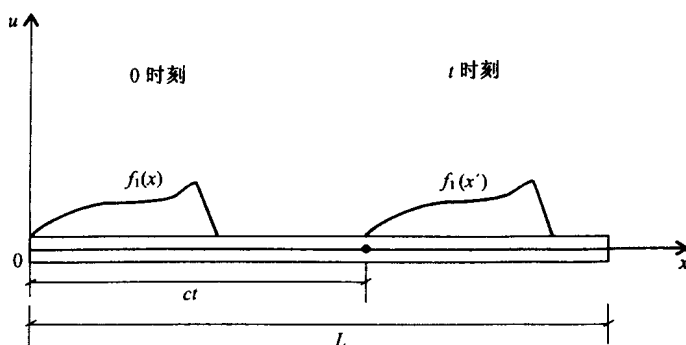


图 3.1.2 波形以速度 c 传播