

中国工程地球物理 检测技术 (2001)

中国地球物理学会
工程地球物理专业委员会

编著



地震出版社

中國工程地球物理檢測技術

發展工程地球物理檢測技術
提高檢測方法的科學性、專業性

新世紀十月

劉光鼎



中国工程地球物理技术的进展与未来

(代前言)

赵永贵

2001年是中国地球物理学会工程地球物理专业委员会成立4周年,4年来在刘光鼎院士的指导下,专业委员会为中国工程地球物理检测方法、检测技术的发展作了很有成效的工作。1998年在武汉组织的“中国工程地球物理仪器发展战略研讨会”对我国工程地球物理仪器的进步起了重要的推动作用,会上我们对仪器发展方向、技术标准、存在的问题进行了深入的讨论。目前我国工程地球物理仪器整体上与4年前相比已经有了很大的进步,从仪器性能指标、结构外形、工作稳定性等方面都有很大改进,有些仪器完全可以与国外同类仪器相媲美。

我国现生产地质雷达的有4个厂家,生产工程地震仪的有4个厂家,工程声波仪有2个厂家、工程超声仪2个厂家,工程瞬变电磁仪1个厂家,高密度电法2个厂家,仪器性能也在不断改进。

我国工程地球物理仪器的改进还要在两个方面下功夫,一个是检测仪器的图视化和实时处理性能要大大改进,作为工程检测仪器,检测要直观、快捷,现场提供检测结果,因而仪器要软硬件结合,提高实时处理功能。目前这类仪器基本上是空白,需要大力发展。仪器改进的第二个方面是提高仪器的探测能力,探测能力是指分辨能力和探测深度。目前的仪器在这方面存在较大欠缺,包括国外的仪器,尚不能满足工程探测的要求,探测深度大的,分辨率太低,分辨率高的探测深度太浅,努力的方向是在保证分辨率的前提下,加大探测深度,这要求仪器的频带、动态范围、采样率要有较大的提高,特别是动态范围和采样率之间的矛盾,必须尽快解决。其次是提高发射功率和接收叠加技术,要有新的措施,只要现场图视化和探测能力这两方面有所突破,中国工程地球物理仪器的前途是无限光明的。

工程地球物理探测和检测实践提出的问题比我们目前所能解决的问题要多得多。我们探测的技术能力在大量的工程问题面前显得力不从心。有一些问题已提出多年,虽经几年努力,仍未获得实质性进展。现将一些典型问题开列如下:

- (1) 堤坝小洞穴问题;
- (2) 堤坝连体墙质量检测问题;
- (3) 岩土工程中锚锁、锚杆质量检测问题;
- (4) 深埋小空洞检测问题;
- (5) 隧道超前探测问题。

这五大难题从理论上讲是有办法解决的,但是我们目前的检测仪器性能还不适应解决这些问题,需要开发相应的仪器和软件。

总结多年来国内外工程地球物理技术发展的经验，必须走以方法研究为先导，带动仪器设备发展的路线，方法研究与软硬件开发密切结合，才能不断保证方法的创新、仪器的创新，适应工程检测探测的要求。今后应该加强这方面的联合与协作，推广新方法，如表面 CT、面波 CT 技术等，创造工程地球物理的崭新局面。

中国工程地球物理检测技术

(2001)

中国工程地球物理检测技术编委会

主 编: 赵永贵

副主编: 高小旺

编 委: 邓中华 申秋学 李志华 肖柏勋
段喜民 赵永贵 高小旺

封面设计: 徐雁生

ISBN 7-5028-1933-9



9 787502 819330 >

ISBN 7-5028-1933-9/P · 1085

(2483) 定价: 48.00元

目 录

检测理论与方法

套损检测技术研究的现状	张元中 李剑浩 陈国华等(1)
-------------------	-----------------

测井与测桩

高应变检测在 PHC 桩中的综合应用与分析	胡 钧 张建龙(5)
多道瞬态瑞利波勘探及其工程应用	祁生文 孙进忠 冯 伟(14)
高层建筑的变形监测与研究	李清林 范 文 秦建增等(20)
金属沉船打捞净度检测的新方法	王传雷 祁明松 吕邦来(25)
液体和固体的界面是弯曲时弹性波的特性	沈建国 陈 宇(28)

检测技术

钻孔雷达定向测量技术	宋 雷 杨维好 郑 波(36)
钻孔地质雷达工作原理与应用	黄家会 崔广心(40)

仪器与软件

陆地电火花震源的特性及其应用	左公宁(44)
提高瞬态振动法瑞利面波采集质量的有关探讨	黄真萍 简文彬(52)
LTD-3 探地雷达及其工程应用	方广有 曾 奕 王春和等(56)
小波标架变换及其信号描述	张建贵 范承亮(62)
喷粉桩复合地基的群桩效应的试验研究	吕芝全 潘纪顺 孙方宇等(66)
基桩浅部严重缺陷的本构模型与检测实例	刘长来 潘纪顺 吕芝全等(71)
地质雷达测桩方法及应用	孙懿斐 孙铭心 石林珂(77)
大直径人工挖孔扩底灌注桩静载试验分析	贺为民 李松岭 孙铭心等(81)

地下管网、溶洞、基础病害检测

探测地下管线综合模式及工作方法	赵明堂(86)
雷达探测路基下伏空洞应用研究	吕绍林 杨天春(91)
溪洛渡水电站坝基固结灌浆试验检测	沙 椿 黄泽孝(95)
溪洛渡水电站地下厂房地震层析成像	宋正宗 沙 椿 黄泽孝(102)
二滩水电站坝基岩体固结灌浆质量检测	田 鹰 高金刚 沙 椿等(109)
漂驻高速公路粉喷桩施工质量检测评定	孙方宇(116)
井孔测试技术检测岩体与土工建筑物质量	常 伟 刘善军 艾宝利(120)
洞室岩体弹性波测试新法“互换相遇观测系统”	刘善军 艾宝利 常 伟(128)
十三陵电站地下厂房拱座边墙与顶拱衬砌检测	韩连发 钱世龙(132)

低应变桩基检测中特殊桩的检测及资料分析	刘丽敏	杜正涛(141)
物探方法在隧道施工期地质预报中的应用	何发亮	李苍松(145)
丫髻沙大桥钢管混凝土质量声波 CT 检测	谷明成	李苍松 何发亮(150)
郁江大桥桥墩托盘裂缝及混凝土质量检测	谷明成	何发亮 李苍松(156)
高密度电阻率法在隧道洞身病害探测中的应用	蒋伟宏	蒋正红 伍衡昭等(162)
地下管线普查技术在城市地下管线		
信息管理系统建设中的应用	李 玮	杜彦军 王 银(166)
高密度电阻率法在工程检测中的应用		薄会申(171)
负视速度法在长梁山隧道施工超前预报中的应用	董 晨	李 玮 张继令(175)
用 ObjectARX 开发基于 AutoCAD 的轻型动力触探成果表绘制程序	王 闯	苑志强(180)
场地地微动信号的小波分析	简文彬	舒志彪 李哲生等(190)
关于城市内变电站接地网接地电阻测试理论研究与应用		刘小冬(194)
GX-3 智能化地下(水下)管线探测系统及		
GX-M1 磁探仪简介	杨 旭	孙正纲 夏军宝等(201)
高密度电法和瞬变电磁法几个问题探讨	董浩斌	王传雷(210)
工程测井技术在钻孔灌注桩施工中的应用		韩晓南 徐善修(215)
水下目标激光成像探测	昌彦君	彭复员 朱光喜等(222)
利用瞬态瑞利波法检测铁路岩溶路基注浆效果	林 昀	朱正国(227)
弹性波法在隧道围岩分级中的应用		曹哲明(233)
沉降的监测方法——介绍一种沉降仪	王赤军	王宝珍 陈晓东等(239)
三高测量技术探测岩溶	赵 峰	谢明魁(242)
混凝土结构检测方法 & CE2001 工程检测仪的应用		曾向林(247)
反射波法检测基桩完整性的方法与体会	张明启	陈宗起(252)
关于爱迪尔(CIDRC)探地雷达道(路)面测厚精度之管见		任戎征(258)
超声反射波检测技术的应用开发	魏黎民	濮存亭 管 钧(262)
低应变动测相对位移法	蔡若涛	蔡家雄(267)
FDE24 浅层高分辨地震仪探测系统在		
我国金矿构造探查中的应用研究	邓中华	仲伟亚 艾东海(271)
声波测井在桩基检测中的应用	胡 钧	高倚山 张建龙(275)
水下大体积混凝土施工质量地球物理检测	邬 钢	方 华(281)
用 CE2001 检测锚固桩应用实例		曾向林(286)

检测理论与方法

套损检测技术研究的现状

张元中 李剑浩 陈国华

楚泽涵

(大庆测井公司 大庆 163412)

(石油大学 北京 102200)

1 前言

套损是指套管处在地应力的作用下产生变形,从而引起套管的损坏。套损检测是利用测井方法对套管在地应力作用下的状态进行评估,查找已经损坏的区域,为修复套管提供参考信息,对可能损坏的区域进行判断,采取相应的补救措施,套损检测的目的是预防套损,更好地为生产服务。

目前,我国陆上油田大多数处于中后期开发阶段,套损在各个油田普遍存在,严重地影响了生产,套损检测技术研究是当前工程测井技术研究中的一项重要任务^[1]。

2 套损的特点

正确认识套损的原因和特点是套损检测和套损预防的前提。

研究发现,引起套损的因素较多,其中地应力是引起套损最直接的原因,其他因素引起的套损几率相对较少,地应力对套管的作用表现为连续的非均匀载荷,首先使套管产生变形,从而引起套管的损坏。套损与油田进行注水开发有密切的关系,向地层注水急剧改变地应力的大小和方向。统计表明,注水开发油田的套损数量远远大于不用注水开发的油田^[2-5]。

地应力对套管的作用是一个复杂的过程,套管在地应力作用下出现损坏,往往都是一次性的,套损具有“突然性”^[2]。在向地层注水时,引起孔隙压力不均衡,当地层中的孔隙压力超过上覆地层压力时,在地层中出现负有效应力,当负有效应力大于套管的极限载荷时出现套管的损坏。在这种情况下,套损速度很快,并且引起一个区块套管成片损坏,可以形象地比喻为“镰刀割麦子”,大庆、吉林、华北等油田不同程度地出现过此类损坏。

此外,在油田开采过程中,随着地层流体的排除,孔隙压力减小,上覆围岩下沉,引起地层断裂与错动;地层水进入泥岩层段,引起泥岩的水化膨胀,对套管产生巨大的挤压作用使套管损坏,表现为扭断与张性断裂。在注水开发油田中,这是一种常见的套损情况。

3 当前的套损检测方法

目前,主要有以下几种套损检测方法。

3.1 井径测量仪

当套管受力达到平衡时,套管的形状保持为圆形;当套管受力不平衡时,套管的形状变为椭圆形,从而引起套管直径的变化。利用井径测量仪对套管的直径进行测量,分析套管井径曲线能够确定套管内径的变化,定性确定套管在地应力作用下的状态,目前常用的是多臂井径仪。

3.2 超声波成像测井仪

超声波成像测井仪采用旋转式超声换能器对套管内壁进行扫描,将测量到的反射波幅度和传播时间等信息进行处理,可以得到整个套管内壁的高分辨率成像。代表当今超声波成像测井仪技术水平的仪器是斯仑贝谢公司的 USI (Ultrasonic Imaging),国内以华北油田研制成功的 DUT (Downhole Ultrasonic Televiewer) 为代表,国内与国际水平大体相当。利用超声成像测井仪来进行套管检查时,能够确定套管的内径和套管厚度,可以对套管的腐蚀状况进行评估。该仪器实现了成果显示的可视化,是目前套管检测中较为先进的方法。该方法用来检测套管的状态,能够对套管壁进行“观测”,主要检测套管中已损坏的部分^[5]。

3.3 地应力检测

如果地层显示出各向异性,则预示在该地层中的套管处在非平衡的地应力状态之中,套管可能会损坏。通过地应力的检测可以确定套损的方位和预测套损的区域,主要是求出最大水平主应力的方向与大小。目前主要利用声波正交偶极子测井来检测地应力的方位,估算地应力的大小,该方法的原理是如果一个地层存在着应力各向异性,横波传播时产生横波分裂,利用横波与地应力之间的关系,可以计算估测地层应力的方位和大小^[6]。

地应力场是一种随着时间与空间变化的物理场,向地层注水时,由于注入水运移方位的不同将改变最大主应力的方位,在油田开发过程中,地应力的变化是一个动态变化过程。由于地应力检测的复杂性,该方法目前处于理论研究阶段^[7]。

3.4 磁学检测方法

磁学检测方法主要利用磁测井仪检测套管壁厚变化、裂缝和内径的变化。该方法采用的是电磁法测量仪器,属于非接触型磁力探伤仪器,主要用途是检查井下套管的质量状况,定性确定套管内壁和外壁腐蚀、缺损和套管井径的变化^[2]。

以上几种套管检测方法,能够对地应力作用下套管的状态做出定性的判断,不能做出定量的判断。从套损检测和预防套损的角度来看,需要对套管在地应力下的状态进行定量分析,做出定量判断。

4 套损检测的声学方法

石油工业中所用的套管是一种致密钢材,在没有受到地应力作用时,套管可以看作是一种均质各向同性且完全弹性的介质。套管在地应力作用下发生变形,改变了套管的结构,使套管的力学性质发生了变化,主要反映在弹性参数(弹性模量,泊松比等)的变化,因此从原理上来说,只要能对套管在地应力作用下的弹性参数进行定量描述,就能对套管在地应力作用下的状态进行定量评估^[8]。

在测井方法中,与套管力学性质相关的测井方法是声学方法,声学方法可以对套管在地应力作用下的状态进行定量的描述,在套损的定量检测中,声学方法是较为有前途的研究方法。现有的声学测井方法,主要是针对地层的性质进行测量,在套管井中进行测量时,套管波的幅度很小,实际上是过套管进行测量^[9]。利用声学方法来对套管的状态进行评估,还需要对现有的声波测井仪器进行改造,使得声波测井仪器能够较好地反映套管的性质,较为可行的方法是改变现有声波测井仪器的声系结构,将现有仪器的居中声源改变为偏心声源,这样能显著增大套管波的幅度,从而有利于对套管波声学性质的利用^[10]。

在套管检测的声学方法研究中,还需要注意以下两个方面的问题:一是研究对象的选择,目前不少研究者以地应力为研究对象,就套损的定量检测而言,应该以套管为研究对象,套管处在地应力的作用下时,地应力的变化会在套管上出现响应,带来套管声学性质的变化,如果从地应力的角度来检测套管的状态,会将问题复杂化;二是评价参数的选择,在套管状态的评价中,声波速度可能不是一个有效的参数,因为套管中声波速度发生剧烈变化时,往往意味着套管立即就会断裂,从而出现套管损坏,有效的参数是套管中声衰减参数的变化,地应力作用下套管结构的变化,会带来套管声衰减参数的变化,声衰减参数直接反映套管结构的变化。

5 结束语

目前我国陆上各个油田普遍采用注水开采方式,套损在各个油田不同程度存在。针对目前套损检测技术的现状,需要加强对套损检测定量评估方法的研究;由于在注水过程中,地层应力的变化是一个动态的变化过程,从预防套损的角度出发,应该对地应力作用下的套管进行监测,及时预测套损区域,合理进行注水开发,达到有效预防套损的目的。

参 考 文 献

- [1] 陆大卫、赵培华,油气勘探与生产需求是促进测井技术持续发展的动力,测井技术,2001,25(1):3~4。
- [2] 王仲茂、卢万恒、胡江明,油水井套管损坏的机理及防治,北京:石油工业出版社,1994。
- [3] 宋治,油层套管损坏原因分析及预防措施,石油学报,1987,8(2):101~107。

- [4] 崔孝秉、宋治、岳伯谦、曹玲, 注水开发油田套管损坏的机理研究, 石油学报, 1987, 14(3):93~101。
- [5] 贾文玉、田素月、孙耀庭等, 成像测井技术与应用.北京: 石油工业出版社, 2000。
- [6] 陶果, C.H.Cheng, M.N.Toksoz.应用正交偶极子测井资料测量 EDA 地层的横波各向异性.地球物理学报, 1999, 42(2):277~286。
- [7] X.M.Tang, N.Y.Cheng, and Arthur C.H.Cheng. Formation stress determination from borehole acoustic logging: A theoretical foundation.1999 SEG Expanded Abstracts, BG2.7:57~60.
- [8] 中国机械工程学会无损检测分会, 超声波检测, 北京: 机械工业出版社, 2000。
- [9] 楚泽涵, 声波测井原理, 北京: 石油工业出版社, 1987。
- [10] 沈建国、张海澜, 井内偏心声源激发的三维声场的数值研究, 地球物理学报, 2000, 43(2):279~286。

测井与测桩

高应变检测在 PHC 桩中的综合应用与分析

胡 钧 张建龙

(国家电力公司华东电力设计院 上海 200002)

1 前 言

高强度预应力管桩 (PHC 桩) 是近几年发展起来的一种桩基形式, 与灌注桩、预制方桩、钢管桩比较具有较大的实用性。PHC 桩有 300~1000 mm 等规格, 按管桩的抗弯性能或混凝土有效预压应力值分为 A 型、AB 型、B 型和 C 型。其混凝土强度等级不低于 C80。PHC 桩混凝土强度高, 施工可贯入性、耐打性好, 穿透能力强, 可打入较硬的持力层。PHC 桩制桩标准化程度高, 质量比较可靠, 单位承载力工程造价低。PHC 桩配用开口型桩靴, 减少挤土效应。

目前我国打桩的设备和工艺确定主要依靠经验, 因此在许多工程中常因为经验不足锤击力过小或过大导致拒锤或超打现象。因此, 在试桩和工程桩阶段采用高应变动测来检验打桩工艺的可行性, 可以确定优化的打桩工艺, 合理的桩基设计以及良好的工程桩检测效果。

2 场地工程地质条件

500 kV 某长江大跨越采用“耐张塔-跨越塔-跨越塔-耐张塔”方式, 跨越塔档距 2303.0 m, 跨越塔高 346.5 m, 耐张塔高 55.0 m, 与跨越塔相距 700 m。

南岸场地地层自上而下为:

- ①粉质粘土: 褐黄色, 软塑, 下部为流塑, 平均厚度为 1.4 m。
- ②淤泥质粉质粘土: 灰黄色、灰色, 流塑, 夹粉砂薄层, 高压缩性, 平均厚度为 9.7 m。
- ②-1 粉质粘土: 黄色, 可塑, 平均厚度为 4.75 m。
- ③细砂: 灰色、灰黄色, 稍密—中密, 平均厚度为 9.4 m。
- ④粉质粘土与粉砂互层: 稍密, 层理清晰, 平均厚度为 7.1 m。
- ⑤粉质粘土: 灰绿色、暗绿色, 可塑—硬塑, 土质均一, 平均厚度为 8.4 m。

- ⑥粉砂：青灰色、灰黄色，中密—密实，夹粉质粘土层，平均厚度为 9.5 m。
- ⑦细砂：深灰色、灰绿色，密实，平均厚度为 12.5 m。
- ⑧粗砂：灰黄色，密实，局部夹砾石，含砂石胶结物，直径大于 10 cm，平均厚度为 4.3 m。
- ⑨细砂：灰黄色，密实，较均一，平均厚度为 3.6 m。
- ⑩粗砂：灰黄色、灰色，密实，含少量砾石，平均厚度为 5.6 m。
- ⑪细砂：青灰色，密实，含卵石，直径约 8 cm，粗颗粒主要为白色石英砂，平均厚度为 6.7 m。

⑫粗砂：灰色，密实，平均厚度为 3.2 m。

⑬细砂：灰色，密实，此层土未钻穿。

根据勘探结果，北岸塔位场地地层自上而下为：

- ①粉质粘土：褐黄色，上部软塑，下部变为流塑，含铁锰质结核，平均厚度为 1.1 m。
- ②淤泥质粉质粘土：灰黄色、灰色，流塑，夹薄层粉砂，含贝壳碎片，高压缩性，平均厚度为 11.7 m。

②-1 粉土：灰色，稍密，很湿，夹粉砂薄层，含少量腐殖质，平均厚度为 10.05 m。

③细砂：灰色，稍密，夹灰黄色粉质粘土层，沉积韵律清晰，含少量腐殖质，平均厚度为 15.8 m。

④粉质粘土：青灰色、灰绿色，可塑—硬塑，土质均一，含姜结石，直径大于 10cm，平均厚度为 8.1 m。

⑤细砂：草黄色、灰色，中密—密实，局部夹砾砂，平均厚度为 18.45 m。

⑥中砂：灰色，密实，局部夹粗砂层，含有大量的砾石，砾径小于 3 cm，磨圆度较好，平均厚度为 8.05 m。

⑦粉质粘土：灰色，可塑，平均厚度为 3.5 m，此层土分布不均。

⑧粗砂：灰色，密实，主要为白色石英颗粒，夹卵石，直径大于 8 cm，平均厚度为 4.95 m。

⑨中砂：灰色，密实，平均厚度为 7.45 m。

⑩细砂：灰色，密实，夹粉土层，此层土未钻穿。

主要土层的物理力学指标见表 1、表 2。

表 1 南岸土的物理力学指标

土层 编号	土层 名称	含水量 $W/(\%)$	孔隙比 e	压缩模量 E_s/MPa	静探锥 尖阻力 q_c/kPa	静探侧 壁摩阻 力 f_s/kPa	桩的极限 侧摩阻力 q_s/kPa	桩的极 限端阻 力 q_p/kPa	地基承载 力标准值 f_k/kPa
②	淤泥质 粉质粘土	41.3	11.4	3.4	0.50	7.8	20	/	55
③	细砂	25.1	0.70	11.2	19.56	187.0	70	4800	130
④	粉质粘土与 粉砂互层	32.4	0.89	6.1	3.47	99.8	50	2300	110
⑤	粉质粘土	23.7	0.64	7.6	2.66	25.6	50	1900	200
⑥	粉砂	28.9	0.78	/	11.69	256.8	60	3800	160
⑦	细砂	23.9	0.68	/	24.48	264.0	70	5000	210

表2 北岸土的物理力学指标

土层 编号	土层 名称	含水 量 $W/(\%)$	孔隙 比 e	压缩模量 E/MPa	静探锥尖 阻力 q_c/kPa	静探侧 壁摩阻 力 f_s/kPa	桩的极限 侧摩阻力 q_s/kPa	桩的极 限端阻 力 q_p/kPa	地基承载 力标准值 f_k/kPa
②	淤泥质粉 质粘土	38.7	1.08	4.4	0.36	7.3	20	/	55
②-1	粉土	37.0	1.05	/	2.03	32.1	40	/	100
③	细砂	32.2	0.92	7.4	4.81	63.9	50	2400	130
④	粉质粘土	24.3	0.67	12.5	2.90	29.8	55	1900	200
⑤	细砂	25.4	0.71	/	23.23	176.4	65	5400	220

3 试桩检测与分析

3.1 试桩概况

南岸的地质资料表明,⑥号粉砂埋藏较浅(35 m左右),中密—密实,局部夹粉质粘土,选择其为桩基持力层沉桩将较容易,但承载力可能较低;⑦号细砂的埋藏较深(44 m左右),选择其为桩基持力层将获得较高的承载力,但沉桩可能会发生一定的困难,而且对桩的材料、制作及打桩设备要求较高。

试桩选在江南进行,试桩位置放在南岸跨越塔位中心,江北不再进行试桩。试桩选用 $\phi 600B \times 130mm$ 加强型的 PHC 桩。试桩按桩长不同分为 45 m (12+9+12+12)、38 m (9+9+10+10) 两组,持力层分别为⑥粉砂和⑦细砂,每组 3 根。锚桩 16 根,桩长 45m。沉桩采用 D80 锤。桩身混凝土为 C80。试桩桩位布置见图 1。两组试桩分别进行了竖向抗压、抗拔静载荷试验、水平静载荷试验、桩基动力特性试验、高应变动测和低应变动测等。高应变动测采用美国 PDI 公司 PAK 型打桩分析仪。

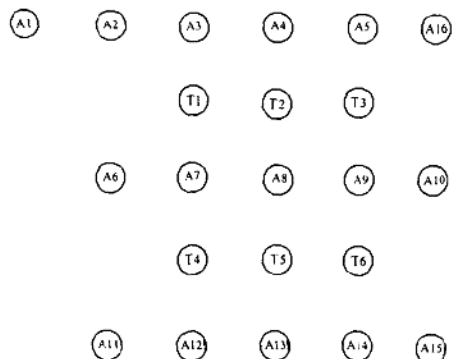


图1 试桩桩位布置

3.2 沉桩可能性分析

根据地质资料,场地砂层较厚,采用美国 GRLWEAP 软件对该工程 PHC600 桩的沉桩可能性进行了分析计算。计算结果表明,桩尖进入③细砂层时,锤击数明显增高,锤击压应力增大,但穿透③细砂层不会很困难,当桩端进入⑥号粉砂后直至⑦号细砂时,桩顶的锤击压应力会达到 30 MPa,最大锤击压应力可能达到 40 MPa。由于桩身为高强度预应力钢筋混凝土,沉桩应无太大困难。桩长 45 m,采用 DELMAG D80 锤进行沉桩,打桩时静土阻力按 6000 kN,单桩极限承载力约 9000kN,打桩时桩身锤击压应力为 30 MPa,最后贯入度为 6mm/击,

锤击能量在 80~90 kJ, 沉桩过程无异常情况下, 总锤击数在 2000 击左右。

实际上除掉 A5 桩差 75 cm 达到标高外, 其他 18 根 45 m 桩都打到设计标高, 锤击数为 1776~2319 击, 平均击数为 1934 击。3 根 38 m 试桩为 1106~1187 击, 平均击数为 1144 击。45 m 桩最后贯入度为 3~10 mm/击, 38m 桩最后贯入度为 18~22 mm/击。在打桩的最后 1 m 做了回弹测试, 45 m 桩最后回弹率约为 69.4%, 38 m 桩最后回弹率约为 28%。

PHC 桩施工前中间是空的, 打桩过程中部分土体挤到桩内, 减小贯入阻力, 但是随着贯入深度的增加, 管桩内的形成土芯。在每节桩的打桩过程中进行了桩内土塞高度测试, 测试结果见表 3。一般认为, 管桩贯入到一定深度将形成闭塞效应, 桩端土无法挤入到管桩内, 此时管桩和实心桩性质完全一样, 因而完全考虑闭塞效应时管桩的打桩阻力将会增大。土塞的测试数据说明, PHC 桩没有因为贯入深度的增加逐步形成闭塞效应, 土芯长度随桩入土深度增加而增加, 而且土芯长度与桩入土深度之比随桩入土深度而增加, 平均排土量随桩长增加而减少。因此 PHC 桩的打桩阻力应小于等截面积的预制桩。

表 3 土塞测试成果

试 桩	土芯长度与桩入土深度之比/(%)		平均排土量/(%)
	范 围	平均值	
第 1 节	5.56~22.50	10.2	96.7
第 2 节	36.67~75.22	55.1	82.3
第 3 节	32.40~88.67	57.3	81.6
第 4 节	48.50~82.08	63.3	79.7

图 2 是试桩每米锤击数和深度的关系。①粉质粘土和②淤泥质粉质粘土是静压入土, ③细砂平均每米锤击数为 52 击, ④粉质粘土与粉砂互层平均每米 60 击, ⑤粉质粘土平均每米 37 击, ⑥粉砂平均每米 69 击, ⑦细砂平均每米 197 击。锤击数并不是随着深度增加而简单增加, 锤击数与土层性质、锤跳高度、接桩位置及时间长短等因素有关。

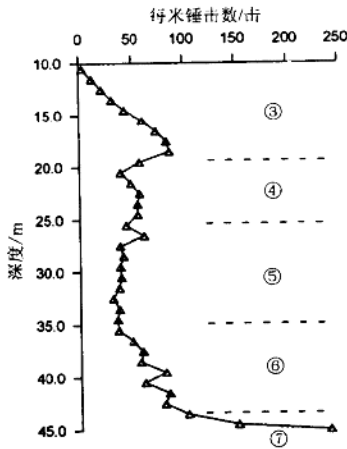


图 2 锤击数与深度的关系

3.3 锤击力与锤击能量的控制

试打桩和打桩监控是高应变动测的特有功能, 其中锤击力和锤击能量的监测是打桩监控的重要内容, 锤击能量和锤击力大小反映了设备的效率, 能量和锤击力越大, 沉桩贯入能力越强。在桩土特性以及施工设备确定的情况下, 桩垫和锤垫的刚度对控制桩身最大压应力起着重要作用。能量和锤击力太大, 可能导致桩身破裂, 能量和锤击力太小, 将会导致拒锤, 沉桩不到位。

试打桩共进行 22 根, 打桩前主要考虑沉桩的可能性。打第一根 A12 桩时桩垫采用纸

垫,锤垫采用2层约7 cm厚钢丝绳,高应变监测表明,最大锤击压力大于8500 kN,锤击能量大于90 kJ,明显偏高,及时将测试结果及可能产生的桩身断裂的后果通知了有关单位。在A3桩打入时,最大锤击压力为10100 kN,锤击能量89 kJ,经高应变动测认为在38.6 m处桩身断裂。分析认为必须改进桩垫,将硬木垫取代纸垫,以减小锤击力。在施打过程中由于无法保证硬木垫的完整性,几乎每根桩都损耗一个硬木垫,施工单位私自在硬木垫下加一块带孔薄钢板,在A1打第二节桩穿越③细砂时桩身出现了5条80 cm长的竖向裂缝,该桩报废,此时锤击压力约10000 kN,锤击能量95 kJ。接着锤垫采用3层10 cm厚钢丝绳垫、锤垫采用15 cm硬木垫加纸垫,这样使得锤击力和锤击能量明显减小,锤击力只有6600 kN,锤击数明显增加,A5总锤击数达到2500击,在离标高75 cm时贯入度仅2.5 mm/10击,最后离设计深度差25 cm停锤。经过锤击力太大和偏小之后,桩垫决定采用纸垫,每节桩及时更换,锤垫采用3层10 cm厚钢丝绳垫,去掉硬木垫。通过这一措施调整,有效地控制了锤击力和锤击能量的大小,保证了以后的顺利施工,并确定为工程桩的施工工艺。

对22根试桩的高应变检测结果统计表明,最大锤击力为10300 kN,一般为6000~8000 kN,最大锤击应力为54 MPa,一般为32~42 MPa,锤击能量为52~98 kJ。因此建议工程桩宜采用DELMAG D80锤或相同能量级别的其他型号的单动柴油锤进行沉桩,最大锤击力宜控制在8000 kN以下,锤击能量宜控制在70~90 kJ。同时施工过程中应注意锤垫和桩垫的工艺并保持锤垫和桩垫的完整与平整。

图3是桩身最大压应力随深度变化曲线。桩身最大压应力和桩锤、落高、桩身特性、土层条件、桩垫、锤垫等因素有关。一般情况下,当土阻力较大、贯入度较小时,活塞就跳得高,桩身压应力就较大。随着锤击数增加和打桩进程发展,桩垫和锤垫的刚度增大,桩身应力逐渐增加。特别应注意桩身、桩锤、打桩机不垂直或桩顶不平整导致的锤击偏心问题,容易导致应力集中,出现桩身破坏现象。

3.4 桩长与极限承载力的关系

为了合理的选择工程桩的桩长,对2组6根试桩从入土30 m起每米进行了高应变动测,测定不同入土深度时的土阻力,以推算不同桩长的极限承载力。不同桩长的最大静土阻力见图4。从图4分析可见,桩长从30~34 m之间,桩极限承载力随深度缓慢增加;从34~44 m,即进入⑥粉砂层以后,极限承载力随深度较大幅度直线增加,尤其从34~38 m增长明显;桩长增加到44 m以后,即进入⑦细砂层以后,极限承载力随深度大幅度加速直线增加。

3.5 初打、复打对比试验

由于工程桩采用送桩器送桩地面以下,只能采用初打试验预估桩的极限承载力,所以要用初打时测得的桩周土阻力进行推算,即以桩周静土阻力与桩在地基土中时间效应系数的乘积为桩的极限承载力。时间效应系数与桩周土性状、桩型、桩径、沉桩工艺和沉桩设备等因素有关,因此选用时间效应系数要慎重。本工程通过同一根桩的初打、复打对比试验确定该工程中同类型桩、相同沉桩工艺、相同休止时间下的桩的时间效应系数。

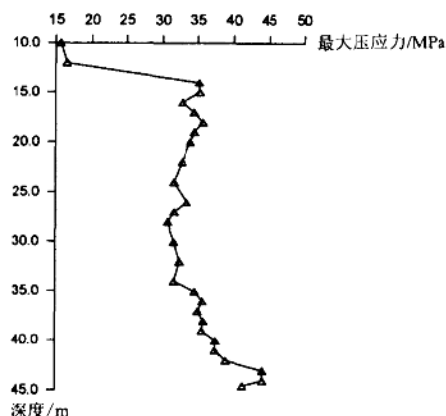


图3 桩身最大压应力随深度变化曲线

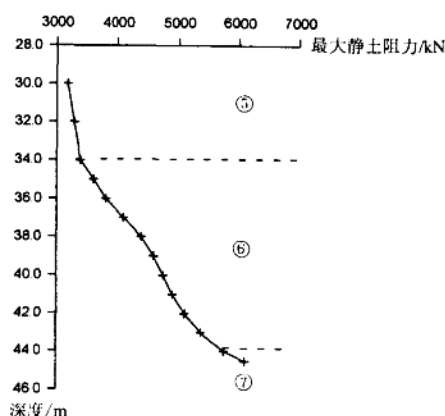


图4 不同桩长的最大静土阻力

两组试桩初打、复打高应变检测及CAPWAPC程序拟合结果的平均值见表4。从表4分析可知：两组桩的桩侧阻力时间效应系数为1.875~2.495，桩端阻力时间效应系数为1.165~1.135，桩侧阻力时间效应系数远大于桩端阻力时间效应系数，桩身阻力时间效应系数相当于桩侧和桩端阻力时间效应的加权平均值。从复打检测中桩端阻力在桩身阻力中所占比例来看，两组桩均为端承摩擦桩，但桩侧时间效应系数相差较大，主要和桩周土的性质有关，相对而言，软弱土的桩侧阻力恢复较多，强度较高的土恢复较少。桩端阻力时间效应系数基本一致。同场地不同桩长的桩身阻力时间效应系数相差较大，竟达21.6%，可见同类桩不同桩长时间效应系数的选取应慎重分析。

表4 试桩初打、复打检测结果

	初打桩 侧阻力 Q_{s0}/kN	初打桩 端阻力 Q_{e0}/kN	初打桩 身阻力 Q_{u0}/kN	复打桩 侧阻力 Q_{s1}/kN	复打桩 端阻力 Q_{e1}/kN	复打桩 身阻力 Q_{u1}/kN	桩侧时 间效应 系数	桩端时 间效应 系数	桩身时 间效应 系数	Q_s/Q_{s0}	Q_e/Q_{e0}
45m桩	4427	1653	6080	8299	1926	10225	1.875	1.165	1.682	0.272	0.188
38m桩	2610	1293	3903	6513	1467	7980	2.495	1.135	2.045	0.331	0.184

4 工程桩打桩监控

4.1 工程桩打桩概况

经过对试桩成果的综合分析，江南岸持力层选⑥粉砂层，北岸持力层为⑤细砂层，工程桩设计长江南岸主塔有效桩长为37.0m，送桩4.2m，每个塔角布桩56根；北岸主塔有效桩长为35.0m，送桩4.2m，每个塔角布桩56根；北岸锚塔有效桩长为35.0m，送桩3.0m，每个塔角布桩6根。共有工程桩520根，全程跟踪进行了高应变动测61根，传感器安装在送桩