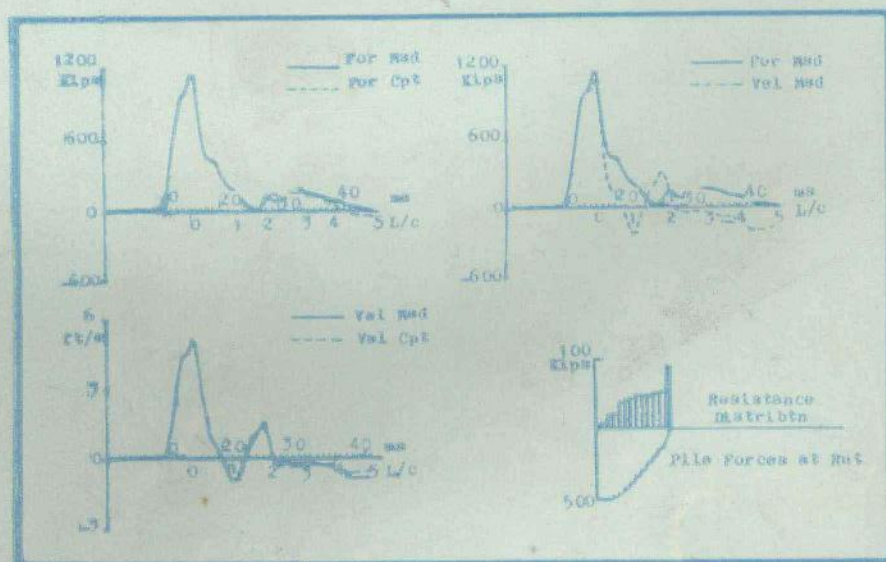


桩基动测

译文集



交通部第三航务工程局科学研究所
交通部第三航务工程局科技情报网

桩基动测译文集

——第三届《应力波理论在桩基工程中的应用》国际会议论文

审 定 伍荣官 朱天益

编 辑 朱光裕 程哲安

交通部第三航务工程局科学研究所
交通部第三航务工程局科技情报网

目 录

第三届“应力波理论在桩基工程中的应用”国际会议

情况简介(代前言).....	(1)
1. 桩基础的设计与试验.....	(12)
2. 关于静承载力的评价.....	(20)
3. 群桩内的承载力差异.....	(25)
4. 单桩承载力的时间相关性.....	(27)
5. 一种新的波动方程分析程序.....	(34)
6. 用应力波测定值估算长间歇后复打时桩的性能.....	(41)
7. WEAP 程序的新进展.....	(50)
8. 近似简化的波动方程分析.....	(57)
9. 打桩波动分析中的土阻尼系数.....	(64)
10. 桩底动力性状的模拟.....	(69)
11. 打桩分析的时空单元法.....	(76)
12. 层状介质中桩尖的三维辐射.....	(81)
13. 桩承载力动力测定系统 CASE 法的研究.....	(88)
14. 用装有量测元件的桩研究应力波法.....	(97)
15. 按两点实测的应力分析桩内应力波.....	(104)
16. CAPWAP 分析结果随分析所选不同锤次的变化.....	(116)
17. CAPWAP 分析结果随操作者的变化.....	(122)
18. 用 TNO 完整性试验和信号匹配技术确定桩中的不连续性.....	(131)
19. 低应变完整性试验的精度与可靠性.....	(139)
20. 低应变和高应变锤击检测桩的完整性.....	(149)
21. 用 TNO 法和激振技术评估基桩的结构完整性.....	(156)
22. 大直径预应力砼管桩打入时桩身应变的量测与分析.....	(160)
23. 粘土中打桩影响的测定.....	(167)
24. 土塞对粘土中桩的可打入性影响.....	(174)
25. 打桩时桩底反力的阻抗.....	(179)
26. 根据应力波测定的简化打桩公式.....	(185)
27. 西德钻孔桩承载力动测法现状.....	(190)
28. FPD5-2 新一代基桩诊断设备.....	(196)
29. 桩锤检测设备.....	(203)
30. 闭幕词.....	(209)
附录:《第三届“应力波理论在桩基工程中的应用” 国际会议论文集》总目录.....	(214)
编后记.....	(219)

第三届“应力波理论在桩基工程中应用” 国际会议情况简介(代前言)

卢世深* 唐念慈**

一、会议概况

第三届“应力波理论在桩基工程中应用”国际会议于1988年5月25日至27日在加拿大首都渥太华召开。由于此项技术在我国介绍推广获得许多单位的应用与好评,因此本届会议我国有卢世深、唐念慈、黄绍铭、袁继洪、王勇、朱光裕、梁守信、赵学勤、宰金璋和王宝林等代表参加(台湾省代表未到)。此会议每四年举行一次,第一届于1980年在瑞典斯德哥尔摩召开^[1],第二届于1984年仍在斯德哥尔摩召开^[2]。据悉第四届将定于1992年在荷兰台尔夫特(Delft)召开。

本次会议共收论文86篇,其中我国的论文共17篇(大陆14篇,台湾省3篇),有6篇进行了宣读。会议人数达188人,远比上两届为多。代表们来自26个国家或地区,提交论文作者的地区分布见表1所示。从中可见,此项技术已开始在全球较大范围内获得推广。我国的论文数已居于各国的首位,也反映出该项技术受到国内各生产、科研及教学单位的较大重视。

表1 会议论文作者的地区分布

地 区	论文数	地 区	论文数	地 区	论文数	地 区	论文数
中 国	17	新 加 坡	5	西 德	2	意 大 利	1
美 国	15	荷 兰	5	比 利 时	2	波 兰	1
加 拿 大	7	澳大利亚	3	巴 西	2	英 国	1
法 国	8	以 色 列	3	埃 及	2	新 西 兰	1
日 本	7	瑞 典	1	丹 麦	2	越 南	1

会议大致分为三个阶段进行,即按论文内容归成理论与模型、完整性试验及工程实例与应用三类进行宣读与讨论。会场一侧同时举办小型展览,约有七、八家公司设有展台,介绍各自生产的仪器产品及顾问公司的业务内容。主要有:美国桩基动力学公司(PDI)和荷兰TNO下属的建筑材料与结构研究所生产的打桩分析仪以及完整性检验用的附加设备,另尚有法国生产的完整性检测仪和美国PDI生产的桩基施工自动记录仪(Saximeter,记录每米锤击数,及按两次锤击声音信号间隙时间估算的落锤高度),锤芯雷达测速仪(Hammer Performance Analyzer, HPA,或称桩锤性能分析仪)和美国生产的打桩垫层材料。

会议中还穿插安排了一次论文展示讨论会(Poster, Session),以解决论文多、时间紧

*交通部公路研究所研究员, **东南大学交通运输工程系教授

的矛盾。即作者在自己的展位上亲自讲解,回答参观者的提问,且可互相深入讨论,不受时间限制。其方式简便,值得国内学术会议借鉴。

大会在会议的正式宴会上由会议主席渥太华大学费伦纽斯教授(Bengt Fellenius)表扬了首创 Case 法动测确定桩的承载力及研制打桩分析仪的美国科罗拉多大学的 Goble 教授和各分组的论文评论者。

会议前后期间,我国代表还应邀访问了渥太华大学的土工试验室,会议主席 Fellenius 教授私人主持的安娜·岩土动力学顾问公司,加拿大国家科学院施工研究所的岩土工程试验室,以及位于美国克利夫兰市的桩基动力学公司等处,获益匪浅。

通过会议,代表们对四年来本专题范围内国际上的发展有了初步了解。下面分别将理论与模型和桩的完整性检测两个主题的主要论文摘要介绍,读者如需作进一步了解,可设法查阅原文及有关参考文献。

二、理论与模型

由于史密斯(Smith)在提出用波动方程分析打桩过程时所取用的土阻力模型(弹簧、缓冲壶与摩擦键)属经验型,因此它不利于对阻力本质的了解,也妨碍了采用已有试验观测资料来取得正确的参数值。因桩侧阻力本质及模拟模型的研究略为简便,且前些年已有所报导,故本次会议较多地讨论远比桩侧阻力为复杂的桩端阻力本质与模拟问题。

法国中央道桥试验所 Dangla 与 Corte《打桩时桩底反力的阻抗》一文,采用了在各向同性、均质弹性、半空间中深埋一个无质量的圆柱体的简谐振动计算图式,并假定桩侧阻力为零,以单独探讨桩底阻力,桩底与土则完全粘连。它比单纯套用机器基础振动计算常引用的弹性半空间体表面作用简谐振动荷载的 Lysmer 解更为符合实际,并且可分析埋深的影响。作者用边界积分方程法求得了上述条件下的阻抗函数。由于打桩时桩底是瞬态运动而不是稳态振动,本来在线弹性介质中可用傅里哀分析变换来求算,而作者在文中则取用工程方法求出在相应频率范围内的参数平均值。研究认为:桩底阻力可以采用常系数的弹簧及缓冲器模型来模拟。并指出考虑深埋因素后,在埋深超过 20 倍桩径时,与浅基础 Lysmer 解相差小于 20%。

比利时法兰克桩公司前付总经理 Holeyman 也对同一问题作了探讨,他在《桩底动力性状的模拟》一文中认为浅基础 Lysmer 解无法考虑打桩时桩底土的非线性特性,于是提出在桩底下设一个高为 H 的土的圆锥截台,其上平面即同桩底面积,截台底面积因经扩大而应力减低,可作为线弹性半空间用线性弹簧及缓冲器模拟。截台可方便地用土层资料化为质弹体系与桩一起进行分析。反算时,可通过计算波形与实测波形的拟合来确定各项参数,各项参数还可利用土的力学试验在给定的加荷速率下测定。

越南的 Nguyen 在瑞典土工研究所(SGI)及瑞典 Chalmer 工业大学所进行的研究^[3],摘要后在本次会中以《打桩分析与沉桩能力分析用的土的新模式》的论文形式发表。他提出的土模式还是以 Smith 模型为基础,略加修正(如图 1 所示),其中缓冲器 a 代表幅射阻尼; b 代表材料阻尼(包括粘滞阻尼和滞迴阻尼);它们均与质点速度成正比。弹簧 c 代表土的静刚度,可按 Lysmer 解求算; d 则为限制土的静阻力(R_u)的摩擦键,均已导出并由土的剪切模量、泊桑比、阻尼比及质量密度等表达。其中各参数均涉及剪切模量 G ,而 G 又与土类、剪应变大小及锤击次数等建立关系,因此把打桩对土性质产生的变化亦可考虑进去。

新加坡大学的周润球博士等的论文《桩的波动方程分析——一种推理理论方法》亦讨论了土参数的取值问题。他所用的土模型与 Smith 一样,但参数不是经验值而是与土的力学特性相联系的,例如单位桩长上桩侧土的刚度(K_s)与阻尼系数(C_s)均按 Novak 取为 $K_s = 2.75 G_s$, $C_s = 2\pi r_0 \sqrt{\rho_t G_s}$, 其中 G_s 为土的剪切模量, r_0 为桩的半径, ρ_t 为土的质量密度,而桩底阻力则套用浅基础的 Lysmer 解。刚度 K_t 及阻尼系数 C_t 分别为: $K_t = 4G_s r_0 / (1 - \nu_s)$ 及 $C_t = 3.4 r_0^2 \sqrt{\rho_t G_s}$, 式中 ν_s 为土的泊桑比。文中分别对室内模型桩及野外工地上桩的实测资料和上述模型取值的计算结果对比,结果较为接近。

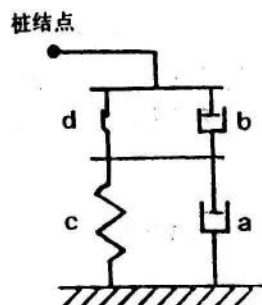


图 1 修正的 Smith 模型

我国访加学者韩英才与加拿大西安大略大学教授 Novak 合作的《竖向简谐扰力下单桩的非线性振动》，介绍了在哈尔滨国家地震局工程力学研究所进行的试验分析结果。试验用大的模型钢管桩($\phi 133\text{mm}$, $t 6\text{mm}$, $L 3.38\text{m}$) 在 $1.5 \times 1.5 \times 3.0\text{m}$ (深) 的试坑中进行,桩埋设在分层振实的中砂中。用稳态偏心陀螺激振器以不同的扰力及频率激振,测得桩土的响应,即使桩顶的最大位移约在 $1 \sim 2\text{mm}$,振动已呈现明显非线性特征。分析采用当量线性化的方法,即阻尼、刚度等参数均视为与振幅大小有关的参数,但仍用线性振动原理进行分析。得出桩土系统的共振频率与线性系统不同,它是随扰力幅值的增大而下降的,振动位移幅值与扰力增幅也不成正比。由实测资料反算的参振土的质量及相应于最大振幅时的当量刚度,随扰力幅值的增大均有大幅度下降。文中作出的解释是桩土间的滑动使土体的几何阻尼不能充分发挥。文中所用方法及所得结论看来有助于更好地理解与掌握目前采用的机械阻抗法测试桩基。

日本 Matsumoto 等的论文《按两点实测的应力分析桩内应力波》则提出了不测桩头的加速度,而在桩头两个不同标高处仅测定打桩应力的方法来研究打桩性状,文中导出了有关表达式并将计算结果与实测结果作了对比。

三、桩的完整性检测

在工程建设中大量采用了桩基,使得桩的完整性问题愈来愈受到重视。其检测方法通常有射线法、声穿透法、取芯法和振动法等。本次会议对属于振动法范畴的高应变法和低应变法的理论与实践成果进行了交流,论文涉及应力波法、振动法、TNO 回声法和水电效应法等;在测得的数据处理方面,常采用信号匹配技术以提高检测能力和精度。文中除介绍了应用的 PDA 打桩分析仪和机械阻抗法记录仪外,还介绍了荷兰 TNO 研制的 FPDS-2 型基桩诊断系统和巴西研制的 PMS 基桩监测系统。振动检测法既适用于打入桩也适用于钻孔灌注桩,检测项目主要有桩截面变化(缩颈、扩颈或正常)、夹层断裂、桩质量及强度和桩长等,也可对打桩应力、贯入度和打桩能量等进行监测,提供土阻力及动、静承载力数据。下面介绍有关本部分论文的主要内容。

(一)、高应变和低应变法

美国 Rausche, Likins 和 Hussein《低应变和高应变锤击检测桩的完整性》一文论述了一维应力波的冲击脉冲传播和反射过程。冲击脉冲在桩头所产生的向下传播应力波 F_1 在桩中某处由于阻抗变化(由 Z_1 变为 Z_2)而分解为向上反射的 F_2 和继续向下传播的 F_3 两个波。

假如桩截面积和桩材料弹性模量均无变化,即阻抗无变化,则 F_i 波不变地向上传播。下行波到达的桩底如为自由时,其阻抗即为零, $Z_2=0$,则此下行波将全部向上反射成为方向朝上的上行波 F_u ;假如桩下端截面积 A 或模量减少,则所产生的反射为拉力波;如增大,所产生的反射为压力波。下行波 F_d 以及上行波 F_u 同冲击波 F_i 的关系可用下面的方程表达:

$$F_d = F_i \left[\frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \right], F_u = F_i \left[\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right]$$

传播和反射的过程如图2所示。

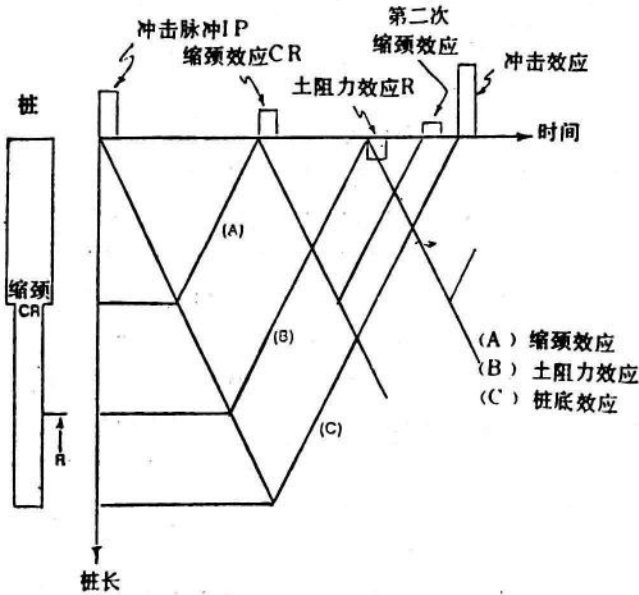


图2 冲击波的传播和反射过程

本文进一步论述低应变法和高应变法的要点及其局限性,并各用实测桩资料论证所检测的桩中缺陷。目前应用的低应变法是以小锤敲击桩头,所产生的桩中加速度较高而应变很小。此脉冲加速度和不连续界面以及桩端处的反射波加速度,可由便携式计算机或打桩分析仪接收、储存并积分成为速度,然后显示出时域内的力和速度图形以供分析使用。如图2所示,桩周土阻力也会产生反射,锤击不当脉冲也会有多次的输入,这样,要区分出冲击波就成为相当困难的问题。解决的方法是对多次的冲击输入的信号取其平均值,藉以克服某次锤击中随机信号带来的影响。对于桩身土阻力很大的长桩,可将记录时间作指数放大的方法以补救桩底信号微弱的缺点,甚至对低能量反射也能作出鉴别。常用CAPWAP-C程序的信号匹配法计算出桩在各种不完整情况下的波形,并加以简单的分类,以便快速地判读解释此类信号。低应变法用于多根桩的检测时显得比较方便,可以通过多根桩的检测结果获得一个典型反应,十分有利于检测结果的判断。在低应变法检测中,很强的桩周土阻力会掩盖桩底土的反射,太宽的脉冲也会使桩头下方不远处的缺陷测不出来;桩的接头间隙也使其下方的缺陷难以测出,这些都是低应变法的缺点。桩长及缺陷的严重程度都会影响到应力波的反射,对此要作出精确的判断是比较困难的;同样,要判断出不贯通全截面的微裂缝也是困难的。当然,低应变法是无法测定桩承载力的。

高应变法用重锤冲击桩头,用打桩分析仪测量速度 V 和力 F ,用应力波理论可方便地按

下式分别算出上行力波和下行力波的数值,

$$\text{下行力 } W_d = (F + ZV)/2,$$

$$\text{上行力 } W_u = (F - ZV)/2$$

据此可以区分出锤击效应和反射。桩周土阻力及其分布是参照 W_u 曲线中压力增大的情况来确定的。按照时间 $2L/C$ 之前的 W_u 曲线的局部减少来确定桩中缺陷, 其缺陷严重程度由系数 β 确定。

$$\beta = Z_2/Z_1 = (1 - \alpha)/(1 + \alpha) \quad (\text{注})$$

式中 $\alpha = [ZV(t^*) - F(t^*) - R]/[Z - (F_i - R)]$, 其中 t^* 为相应于缺陷位置的局部上行力减少时的时间, F_i 为冲击力, R 为缺陷以上的总阻力, $F(t^*)$ 为 t^* 时的力, $V(t^*)$ 为 t^* 时的速度(注: 原文此式在 $V(t^*)$ 前脱漏阻抗 Z ——笔者)。

高应变法虽未能说明桩中缺陷的性质, 但能定量评估桩的损坏程度, 这是它的优点。它的缺点是要用较重的锤来敲击; 另外, 桩中极短距离内的阻抗变化或渐变的阻抗变化均不能由高应变法检测出来。

据本文作者的意见, 如果桩有了缺陷, 不论是高应变法还是低应变法都能把缺陷测出。但如桩较长且桩周土阻力增大, 则用高应变法比用低应变法更有利于检测出桩下段的缺陷。高应变法中的较长的高应变波能穿过所有的桩接头, 而这一点是低应变法难以做到的。只有高应变法能给出桩承载力、打桩应力和桩锤性能资料。故当有疑问的桩为数不多时, 以用高应变法为宜; 当桩数相当多时, 低应变法的应用才有其优点。

(二)、机械阻抗法

美国 D.M.Lilley 等在《已知缺损桩的稳态振动试验》一文中, 论证了属于低应变的稳态激振机械阻抗法, 对设置于高强度水碛土中并预设有已知缺损的 25 根 $\phi 750\text{mm}$ 灌注桩所作试验的结果。方法的原理是依据共振频率, 认为测得的共振频率值的减少同桩中缺损的严重程度(桩的裂缝宽度)有相关关系; 而应力模态形状(Stress mode shape)同自由桩段振型相结合, 可给出该缺陷所在的位置。其经验是应力反节点(Stress anti-node)处的桩的裂缝对桩振动有最大的影响, 相反在应力节点处则最小。桩缩颈或扩颈所引起的共振频率增大或减少主要依缺陷的位置和大小而定。文中根据 Bishop 和 Johnson 理论, 认为具有单个缩颈或扩颈的桩的轴向共振频率应满足方程 $a(A_2/A_1)^2 + b(A_2/A_1) - 1 = 0$, 式中 a 、 b 为与桩轴向共振频率及各桩段长度有关的参数, 而

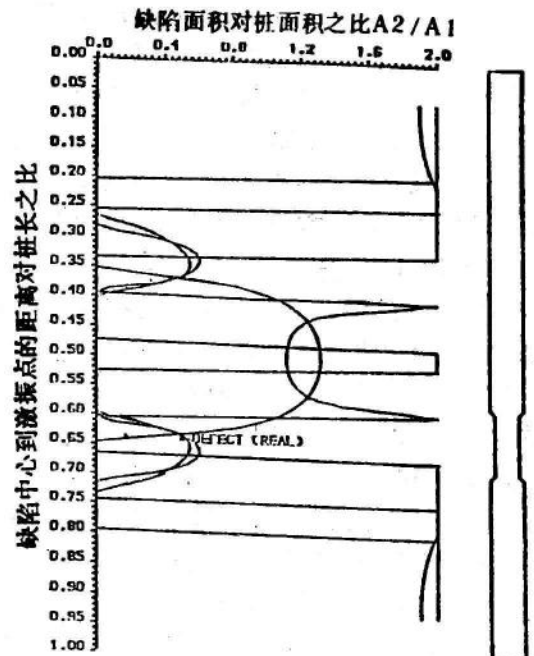


图 3 A_2/A_1 与桩长的关系图

注: β 称为完整性系数, 按 Rausche 等在别处发表的论文, 可用 β 划分桩中缺陷程度: 完好桩 $\beta = 1.0$, 略有损坏的桩 $\beta = 0.8 \sim 1.0$, 损坏的桩 $\beta = 0.6 \sim 0.8$, 断桩 $\beta < 0.6$ ——笔者注。

A_1 和 A_2 相应为缩(扩)颈之前和之后的桩截面积。由阻抗~频率图可查定有三种共振频率, 用此三种共振频率代入上述方程能解得用来确定缩(扩)颈位置和 A_2 与 A_1 的比值的三个关系式。由绘得的图 3 中的 A_2/A_1 ~桩长关系, 可见到三根线交会于两点, 其中任一点的位置确定了缺陷的位置和 A_2/A_1 值。

从桩长和桩径之比 $l/d = 15 \sim 30$ 的这批试验桩中测出了桩中缩颈、扩颈、空隙、砼质量低劣和正常桩等多种情况。

机械阻抗法同其他的一些检测方法的比较在新加坡 Buttlings 等的《桩的低应变或高应变法完整性试验》一文中有一对比验证。新加坡曾对 $\phi 600\text{mm} \times 18\text{m}$ 挖孔桩用了机械阻抗法、振波反射法、修正冲击法、声波反射法以及静载试验作过对比; 又对 $\phi 1000\text{mm} \times 30\text{m}$ 钻孔灌注桩用了机械阻抗法、声波反射法、振波反射法和应力波法(5t 重锤)作了对比试验。在后一实例中, 因无导杆而发生锤击偏心, 使应力波法未获令人满意的结果。

通过对比试验, 作者认为: 1. 这些方法各有其适用范围及局限性。2. 声波反射法适用于桩的长径比 $l/d < 26$ 时。3. 机械阻抗法, 修正冲击法和振波反射法除了均有 l/d 值的限制外, 还受到扩颈以及缺陷上方的土层变化的影响。4. 应力波法要备有重锤和良好的导向, 它可检测裂缝位置、宽度, 还可测定桩的承载力。5. 静载试验法可测定桩承载力(短期承载), 但不能检测缺陷。

一般用机械阻抗法来检测桩的缺陷及桩的动刚度。浙江省建研院潘树声的《用振动法作桩的质量控制和承载力确定》一文论证了机械阻抗法的实用经验。文中以实测的 $V/F \sim f$ (阻抗~频率) 曲线的初始段的桩头动刚度 $2\pi f/[V_0/F_0]$ 为根据, 并认为此动刚度相当于该桩在静载作用下的沉降~荷载曲线的初始段切线模量。另外, 文中按 Kezdi(1957) 的荷载传递法, 求得静载作用下的沉降和荷载的表达式, 从而求得沉降~荷载曲线, 进而求得静承载力同桩头刚度比值 K_r 。由 50 根桩的静、动载试验对比, 可知 $K_r = 0.96 \sim 2.15$, 且其值与桩径无关而和桩长有关。以 K_r 值乘机械阻抗法试验得到的桩头动刚度就可求得桩的静承载力。根据试验对比, 这一方法求得的承载力的误差在 20% 以内。

(三)、TNO 法

TNO(荷兰应用科学研究组织)法是 TNO 所属的建筑材料和结构研究所在 70 年代初研制的基桩检测法, 已有定型的检测仪器和 TNOWAVE 程序, 在许多国家实用后已积累有十余万根桩的检测经验。试验时, 以手锤敲击桩头, 用设置在桩顶的加速度计接收锤击产生的振动波, 它是低应变型的一种检测方法。在本次会议中, Middendorp 等的《用 TNO 完整性试验和信号匹配技术确定桩中的不连续性》采用一根或多根完好桩作为参考桩, 求得其平均反应, 据此参考桩的平均信号用 TNO 应力波程序迭代推求桩周土产生的影响(桩周土线性阻尼、桩底土线性弹簧和线性阻尼)。然后测量被检测的其他桩在手锤敲击时的第一个反射波, 当它和参考桩的波形有较大差异时, 就可确定被测桩中的不连续性的所在位置。在迭代推求桩周土影响时, 可利用地质勘探资料来确定土的初始力学指标值, 并将土性按线性模型处理。这是因为在手锤敲击下的桩位移远小于 0.1mm 的缘故。带有测力器的手锤可测得冲击力, 以之作为桩头的一个边界条件; 或以实测的最初部分的速度乘以桩头阻抗值求得冲击力, 也可用半正弦波或三角形波函数表示冲击力。

在本法的数据处理中的信号匹配技术可分为两阶段进行。首先是从参考桩的信号匹配求得桩周土阻力及桩底土阻力的分布, 其次是对其它被测桩不连续性产生的反射所作的信号匹

配, 以此确定不连续性的位置。信号处理中, 以冲击力作为输入并用桩头实测速度来验算确定计算速度值。然后变化桩的截面积, 经过模型数值计算, 使计算信号同实测信号接近或符合。如果两者相符, 可认为所选用的桩截面即为不连续性的定量表达。在本法中, 所有引起不连续性的因素, 如扩颈、缩颈、夹层和劣质或不均质桩均用截面积的变化来表示。本法的仪器采用了随时间作指数放大的增益方法, 使桩底土阻力的微弱信号可被放大 50 倍。据试验比较, 本法检测不连续性的误差为 15%, 检测程序如图 4 所示。文中举出了预制桩和钻孔灌注桩的检测实例。

TNO 法和机械阻抗法比较在埃及 A. H. Hassanein 的《用 TNO 法和激振技术评估基桩的结构完整性》一文中有所论述。文中举出了 $\phi 508\text{mm} \times 13\text{m}$ 的桩在成桩 9 年后用这两种方法所作的试验。TNO 法测得的结果是 $v \sim t$ 曲线 (v ——质点速度, t ——时间), 机械阻抗法试验得到的是 $v/F \sim f$ (F ——激振力, v ——速度, f ——共振频率)。有两根桩经用两种方法都测得有缩颈现象, 另一根桩均测定为完好桩, 但该桩曾目检出的微裂缝均未由该两法测出。两法检测项目均为: 桩截面积、桩质量和桩长度, 但如果桩截面积无变化, 而钢筋骨架有偏心, 则露筋缺陷及扩颈下方不远处就出现的缩颈均不能由该两法检测出来。机械阻抗法对缩颈似较敏感, 桩直径减少 20mm 的缺陷能被它测出。但如扩颈上方有缩颈, 则此法只能测出扩颈而测不出缩颈。Davis 曾认为扩颈如在较深之处, 则扩颈以下的情况也无法测出, 但在本次试验中, 14 根桩有 8 根桩被测出扩颈以下的缩颈。TNO 法则没有上述的局限性, 扩颈上方的缩颈均可测出。

埃及 A. H. Hassanein 的另一篇论文《沿桩长评价桩的平均抗压强度》根据 TNO 法和取芯试样数据提出了在低应变情况下检测桩中桩强度的方法。该法是先对桩作 TNO 试验, 求得应力波速度 $C = 2L/T$, 式中: L ——桩长度, T ——时间。同时求得可作为桩中桩质量判断依据的桩阻抗 $Z = \rho CA$, 式中 ρ ——桩的质量密度, A ——桩截面积, C ——波速。另由桩头取桩芯样若干块并在室内测量其抗压强度 R 同声速 v 的关系, 其关系表达式采用

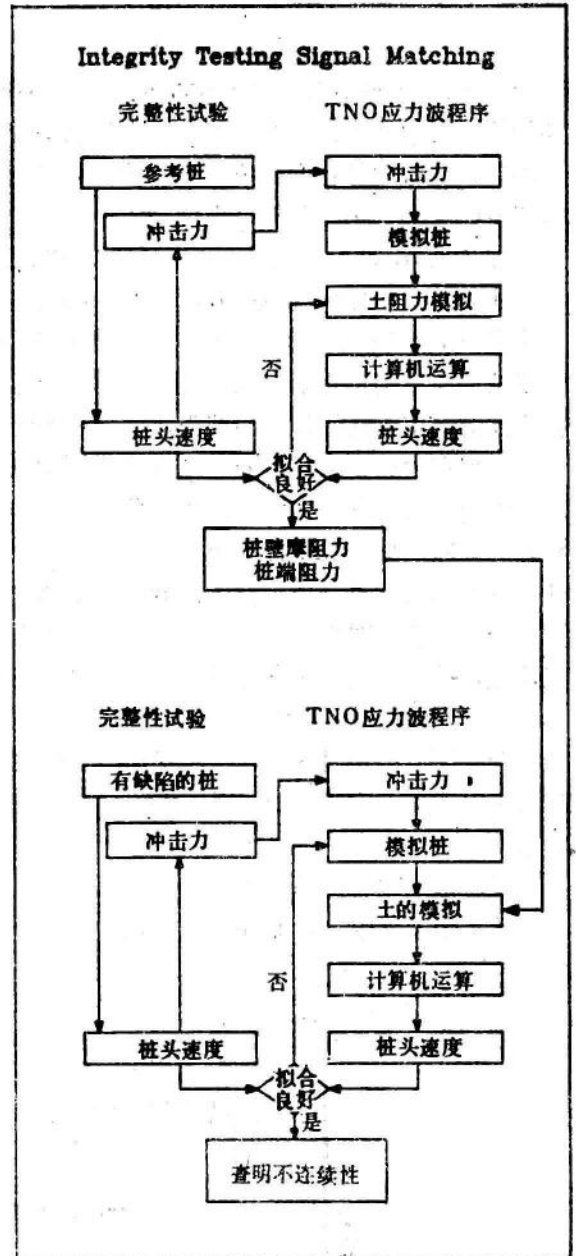


图 4 检测程序框图

$R = aC_t e^{b\bar{v}}$, 式中: a 、 b 、 C_t 为由芯样确定的系数, C_t 为相关系数, $\bar{v}$ 为 v/C 的平均值, 此即推求被检测桩中砼平均抗压强度值的公式。从实践经验看, 虽然 v 值变化较大, 但是 $r = v/C$ 的变化却不大, 由 1.055 变化到 1.0898。由实测得知, 砼立方试块强度不但低于上述计算值, 而且也低于芯样强度。沿桩长的计算平均抗压强度约为芯样抗压强度的 +24% ~ -25%。再者, 芯样中波速 v 是体波传播速度(三维), TNO 试验的 C 值则是杆件中的波传播速度(一维), 两者是有差别的。

加拿大 Starke, W.F. 等在《低应变完整性试验的精度和可靠性》一文中以两组试桩(分别为 $\phi 620\text{mm} \times 7.3\text{m}$ 和 $\phi 810\text{mm} \times 9.5\text{m}$)的实测波形和拟合后的计算波形的对比资料, 论述了 TNO 试验的精度和可靠性。文中按照 TNO 法的基本原理首先建立参考桩的土阻力模型, 并以桩截面积变化表示桩阻抗变化。再将计算机中存储的参考桩力波输入到被检测桩中, 并按上述的已定模型使计算的桩头速度等于实测速度。在拟合计算中虽然无法模拟受杂质污染的砼, 但在污染处或断裂处, 应力波消失的现象则甚为明显。试验表明, 桩中不同缺陷所呈现试验波形各有其具体型式, 可据此对缺陷作出定性或定量的解释。对 $l/d < 30$ 的桩能测到桩底的反应, 桩太长或桩周土太强或不连续性程度严重, 则桩底反应不能被测出。此外, 还证明桩中应力波遵从一维波传播规律, 手锤的敲击尽管会有差异, 但振动波图形的重现性仍然很好。所测得图形的质量受桩头条件及冲击力值的影响, 须由有经验的人员操作。信号匹配处理可结合地质勘探资料考虑, 也宜由有经验人员处理。

美国 Nanping Hsieh 等《科罗拉多州格林伍特峡谷大直径墩基的应力波传递试验》一文, 介绍了美国由手锤敲击获得的波速曲线检测墩基完整性的经验。墩基直径 1.8m, 深 17.4~21.7m, 其中 10 座为端承型式, 嵌入基岩 0.6m, 18 座为摩擦型式。带测力器的手锤敲击埋置于墩顶的一颗钉子头部, 所产生的敲击力信号输入到数字型记忆示波器中, 在墩顶侧面设有加速度计, 另在钢筋骨架旁边预埋有拾振器, 加速度计和拾振器所接收的信号均输入到数字示波器中, 可储存于软盘也可显示于屏幕。获得的响应图形如图 5 所示。

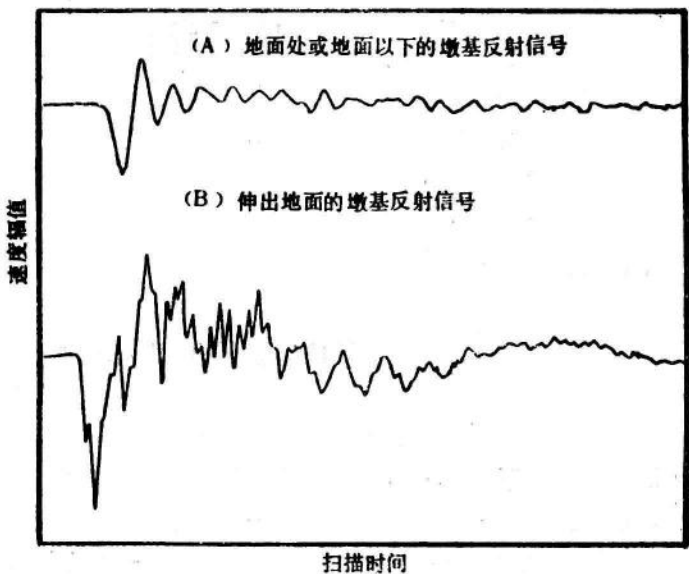


图 5 屏幕上显示的速度图形

根据这一方法检测到端承墩基中有4座为正常,有6座有问题,18座摩擦墩基中17座正常,1座有问题。

(四)、前进波和反射波线性组合处理

近年来日本对低应变法由于锤敲击所得的桩头振动反应,用傅里哀快速变换(FFT)和互谱技术的试验进行了研究,认为其方法可付诸实用。日本 Koniti Kido 等在《分析桩头对锤击脉冲的反应诊断桩的局部折曲》和《分析桩头对锤击脉冲的反应估计桩形状》两文中介绍了这一方法的原理。两篇论文内容基本相同,假设敲击波反应由前进波和反射波的线性组合构成,每一前进波和反射波都由折曲位置、折曲截面长度和折曲边缘的反射系数等三个参数来表达折曲情况。应用数学信号处理技术,将上述线性组合的响应模式同桩头的冲击反应比较,从而求得上述参数。设振动反应为 $Z(t)$,它经过 FFT 变换后连同其输出信号 $x(t)$ 都被放大并经过 12 位 A/D 转换器转换为 $Z(n)$ 和 $x(n)$ 而存储于软盘,取样频率为 25.6kHz。实用时,按通用的互谱技术求出锤击脉冲驱动力 $x(n)$ 转换为振动反应 $Z(n)$ 时的传递函数 $H_0(\omega)$ 。此 $H_0(\omega)$ 由 16 对的 $x(n)$ 、 $Z(n)$ 决定,以消除噪声成分。然后将得自逆傅里哀变换的脉冲反应 $h(n)$ 加以积分,以求得体积速度信号 $y(n)$ 。 $y(n)$ 可分为前进波成分 $y_0(n)$ 和反射波成分 $y_1(n)$ 。由 16 对的 $y_0(n)$ 、 $y_1(n)$ (其中 $n=0, 1, 2, \dots, 1024$) 求得传递函数 $H(K)$ 和相关系数,从而决定应采用的频率成分频率范围,并将高于此范围的频率从实测反应信号中滤去。设折曲处为缩颈,其截面积为 S_2 ,正常截面积为 S_1 ,则由反射系数 $\mu=(S_1-S_2)/(S_1+S_2)$ 检测出折曲缺陷。据后一篇论文称,此法用于埋置土中的桩的检测工作正在进行中。

(五)、水电效应法

水电效应法是中国创用的一种检测方法,由水中放电所产生的瞬间冲击力施加于桩头,所产生的桩加速度由宽频带水声器和速度传感器接收,并由微处理机处理成为和桩完整性有关的数据。西安公路研究所赵学勤等在《水电效应法无破损试桩》一文中介绍了这一方法在试验中根据信号的功率谱形态将桩区分为 A、B、C、D 四类,A、B 类可容许采用的正常桩,对 C 类桩需分析桩质量,D 类为不容许采用的缺陷桩。

保定冶金部勘察技术研究所韩伯文的论文《振动反射法进行钻孔桩完整性试验》论述了用水电效应法激振所取得的检测结果。信号由拾振器接收后输入到地震仪→磁带→计算机→打印机及绘图仪。根据信号处理后的平均波速、反射波到达时间和振动波幅值、相位三项指标确定桩中缺陷位置及其损坏程度。当桩中平均波速在 1900m/s 以下时,判定为桩质量极差的桩,在 4000m/s 以上时,为质量较好的桩,在此两者之间的桩还分为差、良、好三个等级。本法在用微机处理时,在时域中采用带通滤波,以消除干扰波,用自增益控制,把衰减了的信号放大,并用反滤波处理,以提高信噪比和分辨率。文中列举两根直径 1.0m 桩的检测资料。

(六)、检测仪器

桩完整性试验的一个重要手段是检测仪器。目前国际销售的桩完整性检测仪器主要有美国桩基动力学公司(Pile Dynamic, Inc. PDI)生产的桩完整性检测仪(Pile Integrity Tester, PIT),该公司生产的打桩分析仪(Pile Driving Analyzer, PDA),在增加某些部件后亦可作完整性检测。法国中央建筑和公共工程研究所(CEBTP)有 MIMP-12 型桩完整性检测仪,带有高对比度的液晶显示,软盘可存储 300 根桩数据,通过 RS232 接口输入到微机

处理,适用于 0—1000, 0—2000 和 0—5000Hz 三种脉冲频率。荷兰的 TNO 桩完整检测仪也有相当的使用经验。

本次会议中,荷兰 Reiding, F.T. 的论文《FPDS-2 新一代基桩诊断系统》简要介绍一种室内和现场两用便携式 IBM PC/AT 兼容计算机的基桩检测系统(Foundation Pile Diagnostic System FPDS),它可作 TNO 完整性检测、动荷载试验、打桩分析、信号匹配、打桩预估、桩锤监测和结构振动监测等应用。其完整性试验用手锤敲击桩头,而动荷载试验则用带导杆的 200~20,000kg 自落锤冲击桩头。接收探头为加速度计,屏幕显示的是速度~时间曲线。应用滤波、多次锤击平均、按时间成线性或指数放大等提高放大率和分辨率的技术,以补偿由于桩周土阻力而引起的信号衰减。此项衰减率常达 2~8dB/ms,可使桩端的响应幅值降为桩头锤击幅值的 1/1,000~1/10,000。对信号的解释判读应用了 TNO 应力波程序的计算机模拟技术;对于静承载力测定,则在动荷载试验结果作处理求得桩周土和桩底土两部分阻力后,还应确定静、动载的相关关系。这一关系可通过现场某一根桩的静荷载试验结果或由地基土质资料计算静承载力结果来确定。对于打桩分析,本仪器通过两只加速度计和应变计联合在一起的传感器作检测,对每次锤击进行计算并存储其最大拉、压应力、能量、土阻力和信号质量参数等多达 25 项数据,并可即时提出检测报告。本仪器尚可作水下打桩检测;探头能耐 50 巴水压力。

巴西也研制有一种桩完整性检测仪。Lopes, F.R. 等的论文《里约热内卢联邦大学研制的桩的监测系统》一文介绍了这一仪器。由桩头应变计和加速度计接收到的信号经放大后输入到监测器内并由示波器显示,亦可用图形数字记录存储和打印,给出随时间而变化的打桩力、能量和按应力波理论的静承载力(不同的阻尼值时)等数据。

(七)、振动检测法的效益

参照本次会议的论文和其他的一些有关资料可知,振动检测法是桩完整性的一种较为普遍应用的检测方法。应用振动法检测基桩可取得较好的技术经济效益,不但在检测出桩中缺陷后可使有关人员心中有数,采取适当的补救措施,而且对被振动检测认为良好的桩,有的专家建议将其安全系数适当降低。对于打入桩,进行振动检测可以防止在桩中产生超限的拉、压应力,且由其压应力值还可了解桩中的环箍应力状态,这一点对空心桩监测是十分有利的。而通过振动检测结果对打桩的锤击能量是否适当可作出判断,则更是国内外所熟知的一种应用。结构物下面已有基础时,振动检测法可检测出桩的长度,这无疑将对其邻接地点修建斜桩基础的设计有很重要的参考价值。从西德 Seitz, J.M 提交本次会议的论文《西德钻孔桩承载力动测法现状》,可由一个侧面了解国际上应用振动检测法的概况。在西德,振动检测法已在打入桩、钻孔桩、打入现浇桩和螺旋桩等多种型式的桩中应用,最大桩径为 1.5m,长度为 32m。用 100kN 重锤冲击桩头,由实测应变值和弹性模量值得到的桩头冲击力,由加速度计测得桩的位移,应用 Case 法承载力作为土阻力的第一步检验。然后用 CAPWAP 法经过迭代并调整土参数,由微机绘图仪和打印机给出其结果。除记录锤击后的桩头力和桩头位移外,还记录时间、每击的永久贯入度和锤击次数。文中举出了砂、卵石地基中 $\phi 1.2\text{m} \times 12\text{m}$ 压浆桩用 5t 锤及落距 4m 的试验,锤击获得的贯入度为 4mm/击,锤击法同静载法试验两者的荷载/沉降曲线相当符合,并证明压浆桩比非压浆桩提高了桩侧阻力 70%,又曾对 $\phi 1.5\text{m} \times 20\text{m}$ 的钻孔桩 100 余根用锤击法作质量检验。经过试验分析,认为对大直径桩,需研究改进其桩端阻力的数学模型。

四、结束语

综上所述, 可见应力波理论在桩基工程中的应用是一个很有实用意义的课题, 可称是桩基工程技术数十年来的一项重要突破, 使桩基的设计、施工与质量检验多方面都从单纯的经验开始走向在理论的指导下发展的道路。今后无论在海洋石油桩基平台, 港湾桩基工程, 重型陆上桩基工程中, 还是在平常中小型桩基工程中, 都有应用的地方。该项技术所须的先进设备引进亦已不少, 国产化亦已提到日程上来。目前迫切的任务是如何加强基础理论的研究, 充分发挥已引进设备的作用, 特别是高等院校基础工程教学内容中, 亦应引入这方面的新内容, 并给予适当的学时保证。

在应力波理论应用中涉及不少的桩土参数, 选用时常有一定的经验性, 如何将这些参数与土的常规物理力学特性联系起来实为关键问题。本次会议中有在瑞典学习的越南学者 Nguyen 论文中介绍了他在这方面的工作和其他学者的类似努力, 可能使应力波理论计算所须参数由相应剪切应变下的剪切模量等土的力学性能指标来求得, 也许可成为本专题研究方向上的一个重要转折点。

低应变类试验由于方便, 各国竞相发展, 几乎各种动测方法都已研制配备了可一机多用的增测低应变试验的部件。国外的看法依旧认为低应变类因激振能量过小, 不能使桩土产生相对位移, 因而无从“实测”桩的承载力。由于试验的经济效益较高, 竞争剧烈, 因而宣传低应变类方法的功能方面, 国内外都有言过其实的倾向和缺点, 必须引起工程技术界的注意, 否则将造成不必要的人力、物力和财力的浪费, 甚至还可能给工程留下隐患。

随着大直径钻孔灌注桩或墩基的逐步推广应用, 很多柱基是由单根墩基支承的, 因而检测的要求亦将随之提高。这类基础由于承载能力之高几乎无法以静载试验检验其承载能力, 高应变动测便成为唯一的检测手段。但必须指出, 这种动测必须经过周密的预先分析及严格的监控, 以免在测试过程中使桩受损。我国在这方面的技术已有一定经验, 水平亦不低于国外。

最后, 应该指出: 国内不少部门和学者(包括台湾省海洋大学的梁明德博士), 在本专题研究和应用上起步虽较迟, 但从论文内容看他们的工作踏实的作风值得我们学习。希望今后能进一步相互协作、加强交流, 共同把我国的建设事业和学术研究提到一个新的水平。

五、参考文献

- [1] 唐念慈, “参加瑞典‘应力波理论在桩基中应用’国际讨论会小结”, 南京工学院国外科教通讯, 1980年第6期。
- [2] 唐念慈、梁守信, “应力波理论与桩基工程”(出国参加会议访问小结), 甘肃省建筑科学研究所, 南京工学院土木工程系, 1984年9月。
- [3] Nguyen Truong Tien, Dynamic and Static behaviour of driven piles, PhD thesis, Swedish Geotechnical Institute Report 33, 200p, Linköping, 1987.

桩基础的设计和试验

[美] G. Likins, M. Hussein, F. Rausche

卢世深 译 周国然 校

引 言

在房屋建筑、桥梁、塔架、堤坝和其他一些重型结构的广阔范围内，桩常是最基本的一种基础型式。用不同配置的打桩设备在各种地基土以至成层土中沉设的各种型式的桩，在建成安全而经济的构筑物时都曾使设计工程师面对着许多很困难的问题。

传统上采用静力计算、试验桩、打桩公式和静载试验等方法来验证桩基础。随着强有力的计算机和现代化电测技术的出现，已有了用于分析和施工控制的多种改进的技术，可以帮助工程师来寻得一个安全而低廉的设计方案。

本文将评述波动方程分析以及诸如 PDA 等动力监测设备同其它打桩锤性能监测设备的差别，兼论及前者同现代沉桩实践的正确关系。

基础设计

采用桩基础时，常根据结构上的荷载和当地经验选择桩型，而桩的极限承载力或则根据桩本身强度或则根据桩周土承载力来确定。桩土体系的承载力(以及长期沉降)可根据土力学和比较细小的探头的静力或动力触探试验，按土的静力分析所决定的桩长来作出估计，供投标应用。由于多数桩基础含有作为一个整体起作用的多根桩，故必须考虑和整个桩群相比较的单桩承载力。

但是，这些承载力估算在很大程度上都涉及数据解释问题。土的各种不同的测试方法及据其作出的评估可能导致差别很大的多种设计方案。大多数现场在整个场地内的地基土条件还有很大的变化。其结果，作为任何一种基础所必需的静力分析，在应用上却极少作为唯一的一种评估手段。由于其精度的不确定性，所要求的安全系数将变得过高而在经济上不合用。

静力试验

传统上，“桩试验”是指静载试验。在实践中，静力试验或则证实桩能承担使用荷载而无过度的沉降(鉴定试验)或则由极限荷载确定一个容许荷载。不幸的是，鉴定试验甚为流行，以致形成的承载力偏高和较高的基础工程造价。但是，鉴定试验却可在生产桩施工时提供制订一个沉桩准则。当现场土条件有变动或者打桩系统、桩型以及施工技术有变动时，必须随之修改沉桩准则。

静力试验中有施加静荷载和测量沉降两项工作。要用经过校准的压力盒来确定施加的荷载，沉降则需以某一不动的参考梁为基准来测得。这表明试验地点附近范围内必须限制打

桩,且参考梁应远离所试验的桩,并应使其所受的气温影响减为最小。一般说来,在某一荷载时,桩沉降会变成不可接受的,当然,极限荷载或破坏荷载的定义尚在广泛的讨论研究之中(Fellenius, 1980)。

多种地基土在甚至经历试验数个月后的时间里承载力仍在增长。故在设置试验桩后常需等待一段时间才作试验,使地基土得以重塑,并使因打桩而产生的超孔隙水得以消失。

受到静载试验费用和所耗的试验时间的限制,仅有少部分的桩能加以试验。有时在象海域结构等情况,由于大荷载和一些物质上的限制,这类试验实际上无法实行。对于极小的工程项目,试验费用甚至会超过工程费。因此,必须由其它方法来制订沉桩准则。

打桩公式

许多世纪以来,工程师一直靠着每单位贯入度内的锤击数来估计打入桩的承载力。工程师把锤击能量同桩抵抗土阻力而将桩推入土中所作的功相等起来。这些等式被称为动力(或打桩)公式或能量公式。这些等式之所以通用,主要是由于它简单而不是由于它精确。

对这些等式的依赖会导致错误结论。打桩公式不精确的根源在于把打桩锤、打桩系统和地基土模拟得过于简单。实际上,大多数基础工程师都认为打桩公式危险且不可靠,目前一般不主张用它。

波动方程分析

约在一世纪之前,已认识到打桩可用应力波传播理论来作更好些的模拟。专为表达打桩的应力波传播的偏微分方程解由 Timoshenko 和 Goodier(1981)*在《弹性理论》一书中研究提出。这些早期在应用上作的努力,由于表达锤—桩—土系统时所存在的不少困难而受到限制。随后用图解法得到了应力波传播的解(Dejuhasz, 1949)。

在 50 年代, Smith (1960)研究出用于数字计算机的波传播离散解。这种数值解的计算程序被称为波动方程(Wave equation)。Smith 的概念受到重视并得到改进(Goble 和 Rausche, 1986)。和打桩公式不同,波动方程分析能如实地考虑到锤—桩—土系统的几乎所有的各个部分。

整个打桩系统被化作一系列质量和弹簧的模型。各个单元质量和弹簧刚度反映了实际系统中的各组成部件的质量和弹簧。在地面以下的各桩段处的土阻力在模型中由两部分组成:其一和桩位移有关,另一则和桩运动速度有关。和位移有关的那部分土阻力代表了土的静力性状并被假定为随桩位移按线性增大,一直达到一个通常被称为临塑位移(quake—即“最大弹性变形”)的极限变形为止。此后继续增大的变形就不需要添加静力。Smith 建议临塑位移为 0.1 英寸(2.5mm)。但是,其他几位如 Likins(1983)和 Authier 以及 Fellenius(1980)曾报导过比 Smith 建议值高达十倍的桩端临塑位移值显著地影响着打桩时的拉应力和计算的锤击数。

决定于速度的那部分阻力模拟了土的阻尼特性。阻力同速度之间的关系假定为线性的,并由阻尼系数 J 表示。常用土颗粒大小作为选择阻尼系数值的依据。Smith 推荐的阻尼系数是根据桩复打击数同静载试验中破坏荷载的波动方程分析比较中的相关关系来决定的。大的

* 此处的1981疑是再版年代——译者

阻尼系数可能限制了桩的可打入性。不幸的是,大阻尼和大临塑位移的这种状况通常不能单从地基勘察中预知。

在作初始分析时,所有的桩、土和打桩系统的各部件均被假定为初始零应力状态(虽然 WEAP 86 具有处理多次锤击下残余应力分析的能力)。给锤芯施加一个由落锤高度和锤效率计算得到的初始速度。如果缺乏电测或某具体桩锤的既知性能,则是很难估计其效率的。

在一个很短的时段内,锤芯推进了一段短距离,它压迫了锤垫并向桩帽质量施力。锤垫的力由弹簧的刚度和变形计算得出。对于柴油锤,由预压缩、燃烧和膨胀产生的气体压力可按气体定律加以模拟,并被包括在适当的力平衡方程中。根据前一时段步骤对每块质量下的力作了假定,就可计算得到桩帽的加速度。将此加速度求积分,得到此一时刻的速度和位移变化。对每一桩段都作类似的计算。有几个桩段具有由现有的桩段速度和位移所计算得来的土阻力,这一土阻力应包括在该桩段的力平衡方程中。当所有桩单元的力、加速度、速度和位移都已算得后,就可用最新得到的运动参数重复进行下一时段的分析。只要经过足够长时间的这种分析,就可由桩端最大位移中减去桩端弹性位移得到桩的回弹和永久贯入度。

波动方程分析能回答两个问题:第一,能否安全地把桩打到所需的承载力,并对桩、土、锤和锤垫作出完整的描述。第二,当打桩给出观测记录时,桩的静承载力有多大?第一个问题的回答是桩可打入性的研究,在研究了土层断面后,由土的强度参数计算桩承载力并选择桩长度、截面积和桩材料,选择桩锤和桩垫的分析结果还具有评定桩锤能否高效率地将桩打到需要的承载力而不致产生有害的打桩应力的能力。在第二个问题中,当锤、打桩系统、桩和土参数均为已知或估计得出时,可对几个静承力进行波动方程分析,所得到的承载力同锤击数的关系称为承载力图。于是,对于某一实测锤击数,就可确定相应的承载力。应考虑土强度随时间的变化(间歇后增长或间歇后降低)。在某些现场,至少应对几根桩复打几下并记录锤击数。

尽管波动方程是打桩分析的好手段,但是任何计算机程序要得到精确结果都需要正确的输入值和恰当的判断。由于计算机解取决于一些假定(锤性能和土参数),所以应有附加的反馈以便证实或则提供变更输入参数的依据。保证获得精确结果的唯一方法是在打桩或复打时实测锤性状和/或桩性状。

观察和电测

打桩锤是一种复杂机具。根据动力来源它可分为自落锤、空气锤或蒸汽锤、液压锤和柴油锤数种,既可以是单作用的也可以是双作用的。大多数锤的操作原理都已写成文件(Rausche 等 1985, Rausche 等 1986)。这些深入的研究已获得的公认的平均效率为:柴油锤 80%,其他一些单作用锤 67%,其他一些双作用锤 50%。但是也有不少离散性较大的报导,因而几乎都需要另作实测。

简单目测是定性评定桩锤系统性状的一种手段。长期以来均用贯入阻力作为土的承载力的一个指标,可制成所谓“贯入一回弹图”来测量桩的暂时压缩。但是这样做是极危险的,大多数工程师已发觉这样做是得不偿失的。在桩锤工作时另作的锤芯观测(行程、每分钟击数等)可用作桩锤总体性能的量度。但是近年来的先进电测设备已经把打桩评价这一问题由一项艺术转变成一种科学。