

---

# 应力波理论与桩基工程

---

( 出国参加会议访问小结 )

唐念慈 梁守信

甘肃省建筑科学研究所  
南京工学院土木工程系

1984年9月

# 应力波理论与桩基工程

(参加1984年5月瑞典第二届“应力波理论  
在桩基工程中的应用”国际讨论会小结)

## 目 录

### 提 要

### 前 言..... (1)

- (一) 关于承载力预测..... (3)
- (二) 沉桩能力分析 & 土参数的评价 ..... (5)
- (三) 桩—土的动、静性状..... (11)
- (四) 锤的性能研究..... (18)
- (五) 现场量测方法与设备..... (21)
- (六) 打入桩与就地灌注桩的质量检验..... (30)
- (七) 以应力波理论为基础的方法的特殊应用..... (34)
- (八) 关于打桩分析仪1984年用户日..... (39)
- (九) 其它见闻..... (42)
- (十) 小 结..... (42)

### 参考文献..... (43)

### 附录一 第二届“应力波理论在桩基工程中的应用”国际讨论会论文 目录..... (44)

### 附录二 带回的资料目录..... (46)

### 附录三 应力波理论的若干关系式..... (49)

# 应力波理论与桩基工程

(参加1984年5月瑞典第二届“应力波理论在桩基工程中的应用”国际讨论会小结)

唐念慈 (南京工学院土木工程系)

梁守信 (甘肃省建筑科学研究所)

## 提 要

本文扼要介绍了作者参加1984年5月28—30日在瑞典斯德哥尔摩举行的第二届“应力波理论在桩基工程中的应用”国际讨论会的主要收获以及应力波理论在桩基承载力预测, 沉桩能力分析, 桩身质量检验, 打入桩桩土相互作用机理, 桩基动测仪表设备及桩锤性能研究等多方面应用的最新进展。作者对应力波理论今后在我国桩基工程中如何进一步推广应用亦提出了建议。

## 前 言

我国在桩基工程中应用应力波理论是早在70年代初期就已在塘沽港口工程中开始的, 重点在于研究钢筋混凝土桩的打桩应力及预防开裂, 1978年渤海平台试桩工程使应力波理论受到广大工程技术人员更多的注意, 接着我国代表又参加了1980年在瑞典首都斯德哥尔摩召开的第一届“应力波理论在桩基工程中的应用”国际讨论会(1)。此后应力波理论在国内桩基工程中继续取得发展并在各方面推广应用, 例如各单位编制了不同功能的波动方程分析微机程序, 甘肃建研所在打桩分析系统方面的研制工作, 四川建研所与中国建科院地基所以及各地用锤击贯入法确定单桩承载力先后通过鉴定, 西安公路研究所与中科院电工所水电效应法无破损检验钻孔桩质量的初步鉴定, 四川建研所预应力碟簧式桩帽的试制, 冶金部勘察科学技术研究所低应变弹性波检测墩基质量的尝试(2), 垫层料材以及桩周土阻力波动方程分析用参数研究列入国家科委重点项目, 沉桩能力分析开始应用以及专题学术讨论会的多次召开(4)等等都充分说明国内在这个领域内学术活动的活跃情况, 而引进的打桩分析仪即将到货又可以使我们具有了更多发展应力波理论的先进有力工具。作者们就是在这样的国内情况下, 有幸参加今年仍在瑞典首都召开的第二届“应力波理论在桩基工程中的应用”国际讨论会的。

与前届会议上我国代表匆促仅作了讨论发言(5)不同, 本届会议接受我国三篇论文, 它们是:

(1) 甘肃省建筑科学研究所梁守信、周福良、孟宪重、杨秀凤: 应力波理论预测桩的承载力;

(2) 四川省建筑科学研究所 谢力子: 按实测峰值打桩力及贯入度确定桩的

承载力,

(3) 中国科学院电工研究所 张用谦; 西安公路研究所李达祥、赵学勤; 桩内反射波的分析与数据处理。

由于种种原因, 本次会议我国只有两名代表参加, 仅第一篇论文由梁守信在大会宣读, 此次出访是在甘肃省科委大力支持下由甘肃省建研所牵头邀请南京工学院共同组团。作者自5月22日晚离京经沙迦, 巴黎抵斯德哥尔摩到6月7日晨原途返京止共计在国外14天。除参加第二届应力波会议3天半外尚参加了由瑞典巴尔干桩基公司主持的第8届打桩分析仪用户日(即经验交流会, 会议资料详附录二(四))2天, 访问了乌波萨拉大学工学系, 皇家工学院岩土力学系, 瑞典BINAB工程公司乌波萨拉分公司, STABILATOR基础工程公司。由于适逢基督教升天节全国性假期以及紧接第二届应力波会议后瑞典土工研究所(SGI)主持召开北欧地区岩土工程年会, 我们不谙会议所用北欧语言, 因此原订技术参观访问计划此部分未能实现, 但我们在返国途中利用巴黎候机的时间参观访问了法国Soletanche地基加固公司及地下连续墙施工工地, 访问了法国Geodia顾问公司和法国石油研究所(IFP), 并在该所由唐念慈作了“中国桩基工程发展的几点介绍”的发言, 互相交流情况。

第二届应力波会议同时有小型展览会展出, 共计七个展览台, 他们是

- 1) 美国桩基动力学公司(Pile Dynamics, Inc)最新的GB型(Pile Driving Analyzer, PDA)。
- 2) 美国桩基动力学公司CAPWAP程序分析及整套微机设备。
- 3) 瑞典PID公司的打桩分析系统。
- 4) 荷兰应用科学研究委员会建筑材料与建筑结构研究所(TNO-IBBC)的桩基诊断系统(Foundation Pile diagnostic System)。
- 5) 荷兰富国国际顾问公司(Fugro Consultants International)的试桩声波记录仪。
- 6) 荷兰鹿特丹船坞公司(RDM)(Cascade insitu hammer)的迭泉式碟簧锤的图片及模型, 以及
- 7) 瑞典土工研究所的最近出版物展览。

本次会议共收论文55篇(目录详附录一)分别由15个国家(地区)单独或合作提出, 出席会议的共有25个国家(地区)的代表148人, 没有台湾代表参加。但在代表名册中会议工作人员曾误将我国代表一人的国籍写成中华民国, 另一人写为中国, 当即由我方提出要求更正。后大会主席Broms教授郑重地在大会开幕词中予以更正并公开表示歉意。本届会议代表人数比上一次多近一倍, 代表所属地区范围亦扩大近30%, 反映了目前国际上工程界对应力波理论应用的重视与浓厚兴趣。有人甚至认为应力波理论的应用及打桩分析仪的出现是近20余年来桩基工程中的最有意义的发展, 也是在土木技术中最先引进电子计算机技术的学科。所以本届会议即使象越南也派遣了由建工部副部长阮孟检(此人50年代曾在北京中国建筑科学研究院

进修)等2人组成的代表团参加。东欧国家有南斯拉夫多人及波兰桩基专家格但斯克工业大学的Tejchman教授前来参加。我们在会议期间与国外同行及专家不仅作了业务上的广泛交流,探讨了今后合作的可能性,(包括邀请专家来国内讲学等)而且在工程教育,桩工设备,垫层材料等方向也作了一些了解,并进行了友好的个人接触。此次出访在甘肃省科委,外办以及我国驻瑞典使馆文化处的领导与具体支持下,在国际友人的热情接待下,使我们的计划得以基本实现,完成了参加会议,掌握本课题方向的国际动态,增进了与对口的国外专家的友谊与关联的任务。

现将所了解的会议情况扼要汇报如下:

### (一) 关于承载力预测

尽管应力波理论用于打桩分析的近代奠基人美国 E. A. L. Smith在他的经典著作中早已明确指出“波动方程的数值计算能提供打桩时的确切情况但不能预测一周或一年以后的情况。如要这方面的资料则必须借助于土力学。”但是确定桩的长期静承载力始终是从生产角度对波动理论感兴趣的主要内容之一。目前一般采用的解决方法有:

1) 在桩打入后经过休息,然后以复打的动测数据用于应力波理论分析,求得的即认为是长期静承载力;或

2) 以打入终了时的动测数据为准求得桩在连续打入时的静阻力再通过动静对比荷载试验积累的资料确定经验的恢复系数来换算成长期静承载力。这显然与静载试验所用方法(如维持荷载法,等速贯入法等;CASE法中是以后法的数据为基础的),确定静极限承载力所用破坏标准以及土质等都有关系,这是必须充分注意到的问题。

在将动测数据进行分析时,目前比较普遍采用的仍为下述三种,(荷兰TNO法本次会议上没有专文讨论,仅见在法国论文中述及曾用以与他法进行对比校核)

#### 1) 波动方程法

波动方程法是大家比较熟悉的。它是在电子计算技术发展以及打桩公式不符实际被认识到以后,由Smith首先发展的。此法将锤—桩—土系统离散化为由一系列质块、弹簧及阻尼器组成的系统以后用数值计算求解。计算机程序是此种方法应用的关键。尽管到目前为止已经出现了多种多样的程序但Rausche认为WEAP程序(1976年)和CU—WEAP程序(1983年)对Smith的基本方法有所发展。前者模拟了柴油锤的热力学特性,后者考虑了打桩时的残留应力(详见下节)。

波动方程法也是我国普遍应用的方法。南京工学院、渤海石油公司设计研究院等单位编制的BF81程序是较早在我国使用的程序之一,此法以锤心速度为初始条件。以后四川省建筑科研所提出了应用Lowery公式据实测桩顶力峰值反算锤垫刚度以提高锤击贯入法准确度的方法。1980年甘肃省建筑科研所编制了输入实测力波的波动方程计算机程序。它消除了桩顶以上锤、垫模拟及与之有关参数确定不准引起的误差,并且在桩土荷载传递规律研究的基础上为准确确定土的动参数提供了可能。甘肃省建筑科研所在提交大会的论文中也介绍了1983年新编制的CH—83程

序,该程序吸收了国内现有程序的优点,可以锤心速度或桩头实测力波或加速度波为初始条件,既可输入模拟信号又可输入数字信号。

## (2) CASE法:

该法是国外现场分析中广为采取的方法,在我国尚未普遍应用,其原因在对于大多数单位来讲加速度计量测系统尚未建立。此法建立在行波理论的基础上,它根据桩顶力和桩顶速度量测值确定作用在桩上的总阻力。其基本公式为:

$$R_t = \frac{1}{2} [F_1 + F_2 + \left(\frac{MC}{L}\right)(V_1 - V_2)] \dots\dots\dots (1)$$

$$R_s = R_t - J_c [F_1 + \frac{MC}{L} V_1 - R_t] \dots\dots\dots (2)$$

式中:  $R_t$ ——总阻力,包括了动阻力。

$R_s$ ——静阻力。

$F_1, F_2$ ——实测力波上,时间相隔  $2L/C$  的二点所对应的力值,  $F_1$  取速度第一峰值所对应者。

$V_1, V_2$ ——与  $F_1, F_2$  所对应的速度值。

$J_c$ ——CASE 阻尼系数

$M$ ——量测点以下桩的质量

$L$ ——桩长

$C$ ——波速

本次会议在RauSche (CASE法的倡导人之一)的一篇论文中(见第6分组论文4),提及根据他们最近在澳大利亚高速公路工程中实测的大量数据,发现如果要使CASE法确定的承载力与下述的CAPWAP法确定的承载力相符须要经常调整阻尼系数,因而认为CASE法用于承载力预测并不可靠,这点在以往未见报道值得我们注意。在本次会议中瑞典Holm亦报道了类似的情况〔详见本文(三)〕。因此国外目前的提法是CASE法提供的单桩承载力仍须有经验判断,主要问题存在于阻尼系数的选用。

## (3) CAPWAP与CAPWAP/C法:

该法在国外是对桩做进一步深入分析时使用的方法,程序属私有不公开。其过程是:以桩头实测力(或以实测加速度)作为边界条件输入,假定阻尼系数、弹性变形及静阻力分布后进行波动分析求解出桩顶速度(或力),将计算结果与实测值相比较,如不符合则修正假定的参数值直到计算与实测相协调为止。通常这种调整需进行20—40次,但在现代化微机运算速度下每次须时并不长(本次用户日会议曾组织代表分组试算,每调整一次不足10分钟,主要化在绘图仅绘出计算结果上)。该法也可确定桩顶静荷载沉降曲线。

近年来CAPWAP法有了发展,出现了CAPWAP/C法。二者在原理上是相同的。区别在于前者利用了Smith质弹模型,后者使用了连续模型,在以下本文(八)中还将进一步介绍。

本次会议在承载力预测方面的另一个显著特点是应力波理论已经广泛用于就地灌注桩承载力的动测方面并取得了成功。这是由于不同直径的钻孔灌注桩（包括大直径）的大量应用，在欧洲已占全部用桩量的70%以上。而且大直径钻孔桩的工作荷载巨大，用一般静载试验方法检验费用过高，同时桩身质量检验的要求亦日益迫切。本次会议中这方面最有代表性的是前已提及的Rausche等的论文（现场具体措施见第1分组论文2）所介绍的经验。所试灌注桩为穿过欠固结软土层而在风化砂岩及玄武岩中嵌固的端承桩，直径1.1至1.5米，桩长达42米。检验施工质量时发现混凝土芯样嵌岩段侧壁夹有100mm厚的泥饼因而必须检验设计承载力能否确有保证。因试验荷载要求达到2000吨如采用一般锚锭或压重进行静载试验则估计须3年时间耗资百万美元以上才能完成，因此求助于动测检验。动测前进行了详细的设计和波动方程分析，关键是如何保证中心锤击和决定锤重、落高、垫层材料及厚度以及如何均布锤击应力等。动测能量必须足以充分发挥土的阻力并达到工作荷载的两倍，锤击力必须达到验收静承载力的大小且不得在桩头及桩身引起破坏。经过使用满意的措施是：桩头用钢管稍为接高并浇灌混凝土，钢管两侧开约 $20 \times 20$ cm的缺口以便按设传感器；制作专用落锤导向架；锤重达20t落高由打桩分析仪现场控制，达1.6—2.5m；最大桩头锤击力曾达3000t；采用厚100mm的均压钢板下加毡垫，锤垫采用了3层10mm厚胶合板夹盖3层12mm厚钢板，其直径均缩小为900mm以便与锤对中。经过这些周密考虑后试验顺利，每桩夯击8次，每天可试3—6根桩。贯入度达到2.2mm/击。并且可用第一击与最后一击的数据相比较来检验桩底岩石是否因试验锤击而受损。测试结果与静载试验结果（预先对动测人员保密的）符合良好，甚至包括侧阻力的分布（CAPwAP法）在内。

有关灌注桩的动测经验在本文（三）中还将有所介绍。

## （二）沉桩能力及土参数的评价

沉桩能力分析是指按各种方法预估桩在不同的打入阶段（深度）受到的极限静阻力，然后依此分别进行波动方程分析，从桩的反应曲线求得不同深度处的打桩阻力（每米所需锤击数或每击贯入度）。这是检验锤—垫—桩—土系统是否匹配良好的重要手段。特别在大型打桩工程中，例如海洋平台尤其注意沉桩能力分析。但分析结果受所用静阻力计算方法及土参数决定，因而受到大家关心，本次会议共有这方面论文6篇，现分别扼要介绍其要点如下：

美国Hannigan通过一项工程实例讨论了桩尖土的最大弹性变形（quake，或PQ）值对沉桩能力及承载力预测的影响。波动方程分析一般采用Smith建议的桩尖PQ值为0.1英寸（2.54mm），但在密实土层中打入大排土量的挤密桩（断面积在 $30 \times 30$ — $60 \times 60$ cm）时已有多起报道发现PQ往往远较此值为大。本文所举实例却与之不同，即使工程桩为低排土量（ $100\text{cm}^2$ ）的H型桩但打入坚硬的冰碛粉质粘土层，在连续打入到设计高程时仍出现高PQ值达10mm。然而在休息2—3周后复打时PQ值却又接近于Smith建议值，即降低为2.5—4.5mm。确定PQ值是通过CAPwAP程序分析，认为使理论计算信号能与桩顶实测信号凑合的参数就是

正确值。在桩顶实测应力波形上的反应则如图1所示,虽然打桩阻力很大,力波的升起很陡,但在时间坐标  $\frac{2L}{C}$  处 (L桩长, C波速) 力波出凹谷,说明桩底反射很小。作者的解释认为这是H桩在进入硬层后在翼缘间形成土塞,因而排土面积猛增至  $929\text{Cm}^2$ , 在土层中产生孔隙水压力积聚升高所造成。休息后孔隙水压消散PQ值亦恢复正常。PQ值增大会使打桩反应曲线下移,使沉桩能力下降,在相同贯入阻力条件下打桩结束时的承载力亦明显下降。

英国Storey等的论文介绍锤击能量相近 (3600—3790kgm) 的三种桩锤 (液压提升式落锤、单作用及双作用柴油锤) 的效率对比及沉桩能力分析, 试验分别在预制混浇土桩及H型钢桩上进行, 采用了如Tufnol, 浇铸尼龙 (Cast Nylon), 象胶石棉 (Rubberised Asbestos) 以及胶合板为垫层材料, 当地土层条件为6—8M厚的砂砾层, 复盖在白垩层上。试验共记录动力波形7000锤以上, 分析结果指出以液压提升式落锤, 即使采用最硬的垫层, 在这种难打的土层条件下效率仍为最高, 其原因是此种桩锤相对柴油锤而言, 锤芯重量大, 落高及锤击初速低。

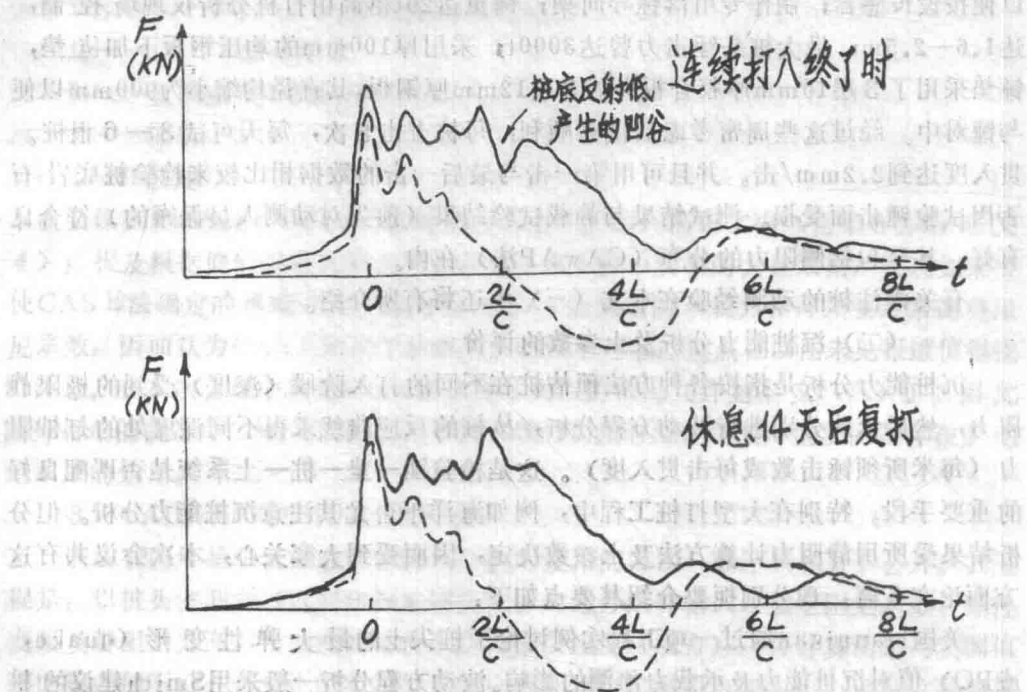


图1 大PQ值在桩顶实测波形上的反映

法国道桥中心试验所研究生Meynard等的论文研究了桩侧阻力的阻尼系数问题, 并通过一根直径2cm, 长12m中部穿过盛有干细砂的砂箱 (70×70×90Cm) 的钢杆, 实测一端锤击所引起的应力波及侧阻反射波来验证研究的结论。作者认为目前波动方程分析所用的侧阻阻尼模型, 无论是Smith或是Goble模型都是经验性

的, 是从桩的理论计算与实测反应间的调整凑合得出的, 没有真正反映桩土界面上的现象与实质。论文介绍了Novak〔6〕的均质、各向同性粘弹性半无限体内圆柱状无限长桩的小位移量竖向简谐运动的理论解答, 认为桩侧土阻力应区分材料阻尼及辐射(几何)阻尼, 但可以综合用分布的缓冲壶来反映, 其单位长度上的阻尼系数 $J$  (KN/m/S/m) 为:

$$J = 2 \pi r_0 (G \rho)^{0.5} \quad (3)$$

式中 $r_0$ 桩径,  $G$ 土的剪切模量,  $\rho$ 土的质量密度。由于 $G$ 与应变的量级关系紧密而在桩周土中产生的剪应变量的量级约在1%左右和法国梅纳旁压仪试验中的应变范围相当, 作者通过两次试桩〔详见第(四)组论文1〕实测信号的反算, 认为用旁压仪确定的 $G$ 值可以作为计算 $J$ 值的初值。作者将实测信号峰值段加以积分, 研究侧阻力与杆速及位移的关系以了解侧阻的实质。结果表明干砂侧阻力与位移成非线性关系与杆速成线性关系并提出了自己的粘弹性阻力模型。

丹麦土工研究所的Denver介绍了利用小型工具式试桩(外径108.2mm, 壁厚8mm, 长3m的闭口不锈钢管桩)在粉质细砂中进行动静对比试验的结果, 试桩在桩顶及桩尖处均设有应变片及加速度计并经室内标定后利用钻探车标准贯入试验的锤击设备(锤重63.5kg, 落高0.45m及0.80m, 桩帽重10.4kg, 胶合板桩垫厚11mm)打入并作应力波测定, 然而以每分钟1mm的速率作等速贯入快速荷载试验(休息时间未说明)最后再作拔桩试验。

作者根据下列关系求得静承载力 $R_s$ :

$$R_s = F_i(t_0) + F_r(t_0 + 2\Delta t) - J_c [F_i(t_0) - F_r(t_0 + 2\Delta t)] \quad (4)$$

式中 $t_0$ 为桩顶实测锤击力波在峰值时 $\max(F) = F(t_0)$ 的时间;  $F_i$ 及 $F_r$ 分别为桩顶处的入射波及反射波, 可根据以下关系式从桩顶实测力波 $F$ 及桩身阻抗 $Z$ 计算

$$F_i = (F + ZV) / 2 \quad (5)$$

$$F_r = (F - ZV) / 2 \quad (6)$$

$J_c$ 为CASE法阻尼系数取为0.1。  $\Delta t$ 为应力波传播到桩底所需时间, 所以式(4)

即为式(2)的另一种形式, 注意其中 $Z = \frac{MC}{L}$ 。作者按丹麦打桩公式倍算了单桩的(静)承载力 $R_d$ , 以便与上述由应力波理论计算的静承载力 $R_s$ 一起与等速贯入静载试验求得的承载力 $R_c$ 相比。比较结果是 $R_d$ 及 $R_s$ 均比 $R_c$ 为大, 相应为1.39—3.61倍及0.98—2.39倍, 但应力波理论承载力 $R_s$ 的统计标准差较打桩公式 $R_d$ 的为小, 说明方法的本质较好, 但作者指出试桩曲线子样数尚不够多。作者尚根据桩顶实测波形求得传递至桩顶的能量 $w$ 为

$$w = \int_{t=0}^{t_1} FV dt \quad (7)$$

$t_1$ 取为 $FV < 0$ 后的第一个 $t$ 值。值得注意的是 $w$ 值仅为桩锤总能量的0.44—0.65。此外作者也指出了短桩上进行应力波量测的困难性。

美国Goble等的论文则讨论了打桩残留应力对沉桩能力分析的影响。残留应力是指桩上虽然早已无荷载作用但桩土界面上仍有剪力作用的现象,它是早在60年代即已被认识到的问题。直到1978年美国Holloway编进了考虑残留应力的波动方程程序后才得出桩难打时残留应力使桩的打入时阻力要提高很多的情况但

Holloway当时的注意力未在沉桩能力分析而在其对承载力的影响。本论文作者亦是美国WEAP程序的编制者,该程序推广后即受到基桩制造商的指摘,认为WEAP程序很大地低倍了某些桩型的承载力,因而作者后按Holloway的方法考虑残留应力加以修正改称CUWEAP程序。图2所示为同一桩分别按WEAP及CUWEAP程序计算得出的打桩反应曲线。CUWEAP程序是多锤分析的程序,它以单锤分析中的离散单元的最终位置作为第二锤分析的初始条件。此种分析的特点是进行到单元的侧阻力均小于土的极限静阻力,位移不再增大或在弹性范围内时动力分析即行停止而转入静力平衡的分析。此时各单元的位移为 $U_0(I)$ ,侧阻力为 $R_0(I)$ 。从静力平衡条件,单元I上的作用力应满足:

$$mg(I) + F(I) + F(I+1) = R_s(I) \quad (8)$$

其中 $F$ 为桩身锤击力,  $my(I)$ 为单元自重,  $R_s(I)$ 为满足静力平衡条件时的土侧阻力。此外

$$R_s(I) = R_0(I) - k_s(I) [U_0(I) - U(I)] \quad (9)$$

式中 $U(I)$ 为静力平衡下的单元位移,尚待求解。同时尚应满足:

$$R_s(I) \leq RU(I), I = 1, N \quad (10)$$

$$0 \leq R_s(N+1) \leq R_u(N+1) \quad (11)$$

式中 $RU$ 为土的极限阻力。上述式(8)可改为

$$gm(I) + k(I) [U(I-1) - U(I)] - k(I+1) [U(I) - U(I+1)]$$

$$= R_0(I) - k_s(I) [U_0(I) - U(I)]$$

$$k(I)U(I-1) - [k(I) + k(I+1) + k_s(I)] U(I)$$

$$+ k(I+1)U(I+1) = R_0(I) + mg(I) - k_s(I)U_0(I) \quad (12)$$

从上式可解得各个 $U$ 值及相应的阻力,如不满足式(10)及(11)的条件,则适当调整平衡方程式(具体方法文中未详)并重新求解。调整时单元的位移均小,其相应阻力的变化有图3中所示的各种情况。在收敛的情况下全部单元的最终增量位移均应相同, Goble采用的标准是满足:

$$\frac{|U_{底} - U_{顶}|}{U_{底}} \leq 0.01 \quad (13)$$

Goble认为钢摩擦桩的贯入度小于7.62mm/击(>40击/英尺)时即应考虑残留应力的影响,而在贯入度仅为1.52mm/击(>200击/英尺)时, CUWEP得出的承载力将是WEAP程序得出的1.4倍,各截面的打桩应力亦相应提高。

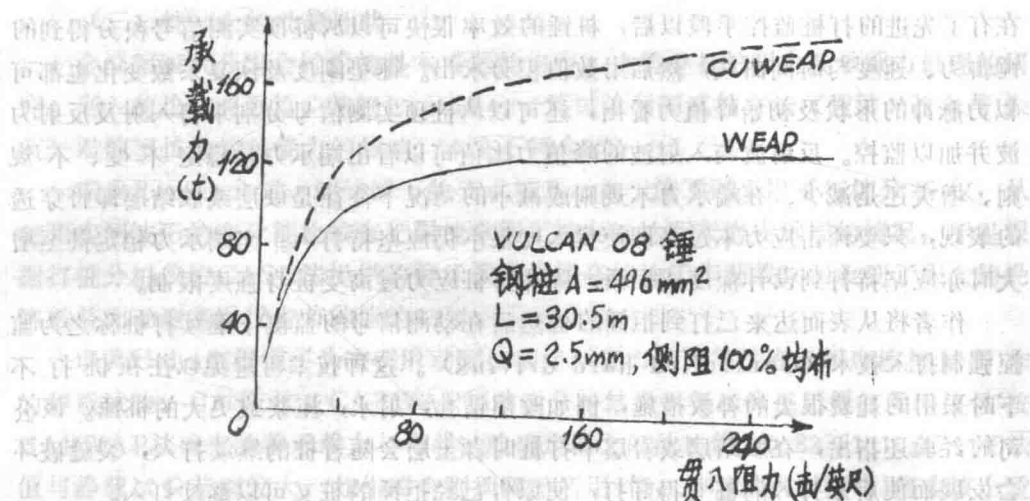


图2 用CUWEAP程序考虑打桩残留应力

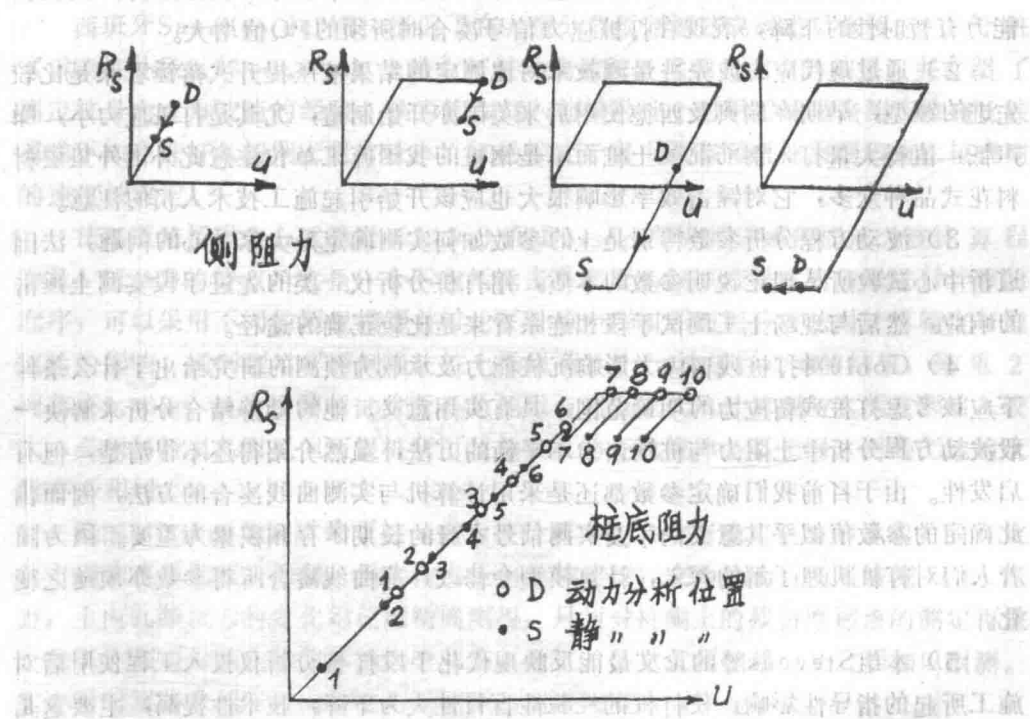


图3 CUEAP程序静力分析中单元位移的调整

沙特阿拉伯的美国MCClelland分公司的Stevens等讨论了桩难打时的施工控制标准问题，论文通过5个工程实例说明了不能单纯以打桩阻力（即打入每英尺或每30Cm的锤击数或贯入度）作为拒锤（refusal）停打的标准。作者在引述了许多常用的拒锤规定后认为拒锤的定义应该和桩锤的效率，即传递给桩的能量有关。

在有了先进的打桩监控手段以后,桩锤的效率很快可以从桩顶实测信号积分得到的锤击力、速度与时间曲线,然后用数值积分求出。锤垫刚度及恢复系数变化也都可以力脉冲的形状及初始峰值力看出,还可以从桩顶实测信号分别求得入射及反射力波并加以监控。反射波与入射波的峰值力比值可以看出端承力是稳定不变、不规则、增大还是减少。在端承力不规则或减小的情况下往往是硬层或胶结层即将穿透的表现,只要锤击应力不过高即使贯入度很小仍应坚持打入。当端承力稳定甚至增大时亦应坚持打到设计深度或拒锤,除非打桩应力过高受桩身强度限制。

作者将从表面达来已打到拒锤的桩然后在动测信号的监测下继续打桩称之为监控强制打入技术(Controlled hard driving)。这种技术可避免以往在桩打不下时采用的耗费很大的补救措施,例如改用钻孔,射水,压浆或更大的桩锤。该公司的经验还指出,在胶结层或岩层中打桩时岩土层会随着桩的继续打入,裂缝破坏会发展而使后来打入的桩变得好打,使原告已经拒锤的桩又可以继续打入。

归纳本专题讨论的内容,值得我们注意的是:

1) 在沉桩能力分析中,高排土量桩打入时在粘土中积聚的孔隙压力,使沉桩能力有暂时性的下降,表现在打桩应力信号凑合时所须的PQ值增大。

2) 通过现代应力波先进量测技术对比测定的结果液压提升式落锤看来是比较先进的锤型,早期在瑞典及西德使用后来英国亦开始制造,尤其是打桩应力小,噪声低,值得大量打入钢筋混凝土桩而不是钢桩的我国施工单位注意此外国外垫层材料花式品种众多,它对锤击效率影响很大也应该开始引起施工技术人员的注意。

3) 波动方程分析参数特别是土的参数如何实测确定是大家关心的问题,法国道桥中心试验所从理论说明参数的本质,用打桩分析仪一类的先进手段实测土锤击的响应,然后与现场土工测试手段相连系看来是比较正确的途径。

4) Goble对打桩残留应力影响沉桩能力及承载力预测的研究给出了什么条件下应该考虑打桩残留应力的明确范围,具有实用意义。他的动静结合分析来解决一般波动方程分析中土阻力与桩锤击力不平衡的方法,虽然介绍得还不很清楚,但有启发性。由于目前我们确定参数都还是采用计算机与实测曲线凑合的方法,因而由此确定的参数值似乎其意义尚不及实测信号本身的长期保存和积累为重要。因为随着人们对打桩机理了解的深入,计算模型会修改,靠曲线凑合所得参数亦须随之变化。

5) 本组Stevens等的论文最能反映现代化手段打桩分析仪投入工程使用后对施工所起的指导性影响,使打桩的经验性盲目性大为下降,技术性提高,主要这是通过仪器及时测定:

- a) 传递给桩身的实际能量;
  - b) 桩身应力值;
  - c) 划分的锤击入射波;以及
  - d) 应力波形的起升速度,形状等信息。
- 而所有这些在打桩分析仪中都是随着锤击实时给出的。

### (三) 桩—土的动静性状

会议第四次分组会讨论的是本专题的内容, 实质是打桩阻力及承载力机理的研究。列入的论文有9篇, 法国Levacher一篇讨论不同成桩方法(埋设, 打入与振沉)对模型抗拔桩承载力的影响, 本文不再介绍。

瑞典Roman介绍一例储罐下的支承桩基, 由于施工时采用了打桩分析仪, 从桩顶实测波形的变化能比较有把握地掌握了桩尖抵达石灰岩支承层的情况, 于是根据打桩分析仪按CASE法提供的静承载力值提高桩的工作荷载30%收到了很大的经济效益而动测费用仅占节约值的20%。

瑞典Holm则报道了为查明用动测法确定承载力的可靠性在5根摩擦桩上所作的静载试验、CASE法及CAPWAP法动测分析结果。得出休息后复打所得信号按CAPWAP法确定的静承载力与荷载试验确定值之间的比值为0.83至1.16。CASE法值与静载试验差别较大, 如作凑合则须调整所用J值, 打桩结束时须将J值由该土质条件下建议0.2提高至0.4而复打时则须提高至0.9方能与静载试验承载力吻合。工地土质为粉质砂及砂土。

西班牙Sanches del Rio报道了在大型分节预制钢筋混凝土后张预应力管桩(雷蒙桩外径1.37—1.68m)上进行打桩动测监控及承载力测定的结果, 并介绍了测定桩身内应力波速的经验。认为桩在打入前横卧地上时用手锤敲击测定波速比较困难不如在桩打入初期土阻力较小, 桩仍接近于自由状态时用桩顶测得的比较规则的速度波确定。

法国道路桥梁中心试验所(LcPc)的Bossard等介绍了该所的应力波计算程序BATLAB的特点, 它是一个不包括锤击系统而是根据桩顶实测信号进行计算的程序, 可以采用不同的阻尼模型并讨论了计算中所用不同积分方法对计算精度与稳定性的影响。同时列举了两例灌注桩上采用荷兰TNO法进行动测的结果, 锤重2吨落高1.60m。认为按静载试验所得的侧阻与端阻值代入计算则与实测波形出入较大, 必须另行引入阻尼但两根桩所用调整参数的变化规律各不相同。两处工地的土质亦不相同。

法国Mizikos等则讨论了桩基应力波计算中土参数与确定桩的静承载力的有效应力理论连系起来的问题, 但未作出任何具体建议, 文中认为目前对桩侧法向压力, 土内孔隙压力的变化均已能精确测得, 只须对桩侧土的残留摩擦角的测定再做一些工作便可以从土层的原始应力状态, 设桩、休息直到加载的全过程加以预测。文中同时简略介绍了在试验室内以模型桩测定侧阻力的少量结果。

西德Seitz介绍了砂土内四根就地灌注桩( $d=0.7-1.5\text{m}$ ,  $L=9.5-15.65\text{m}$ )锤击法动测承载力的结果, 锤重达5t, 落高可视需要调整, 最大为3m。测定时也采用了类似于Rausche等论文所介绍的保护措施以防灌注桩桩身被击坏。动测贯入度达1.2—7.2mm是锤击前后用精密水准仪测得, 动测静承载力达530—1310t。认为灌注桩动测用锤重只须大于桩重的8%便可满足国际标准〔7〕中对动测规定桩必须有1.5—2mm贯入度的要求。文中还指出由于锤击系统的效率、动力性状的

变化以及桩的形状、尺寸等影响，不同系统的数据不宜按桩锤的位能 $mgh$ 进行比较，而应以实际传递给桩的能量（ENTHRU）为准。传递能量ENTHRU可用式（7）由桩顶实测信号求算，一般仅占桩锤位能的20—60%，变化幅度甚大。

从图4可见CASE法所得静承载力 $R_s$ 是随着测定时所用锤击能量，或更精确地给说是随传递桩的能量而变化，因而认为CASE  $R_s$ 值不是承载力的一个“绝对值。”实际上这对所有动测法来讲都是共同具有的问题，因为锤击能量不同使桩土间产生的应变亦不同从而影响土的抗剪强度或承载力发挥。由于CASE法 $R_s$ 与按Davisson准则〔1〕确定的静载极限承载力比较接近，而Davisson准则有人认为偏于保守因此Seitz认为CASE法 $R_s$ 值可作为极限承载力的下限。文中有一根桩进行了CAPWAP法分析，得出的承载力—变形曲线与静载曲线比较吻合。

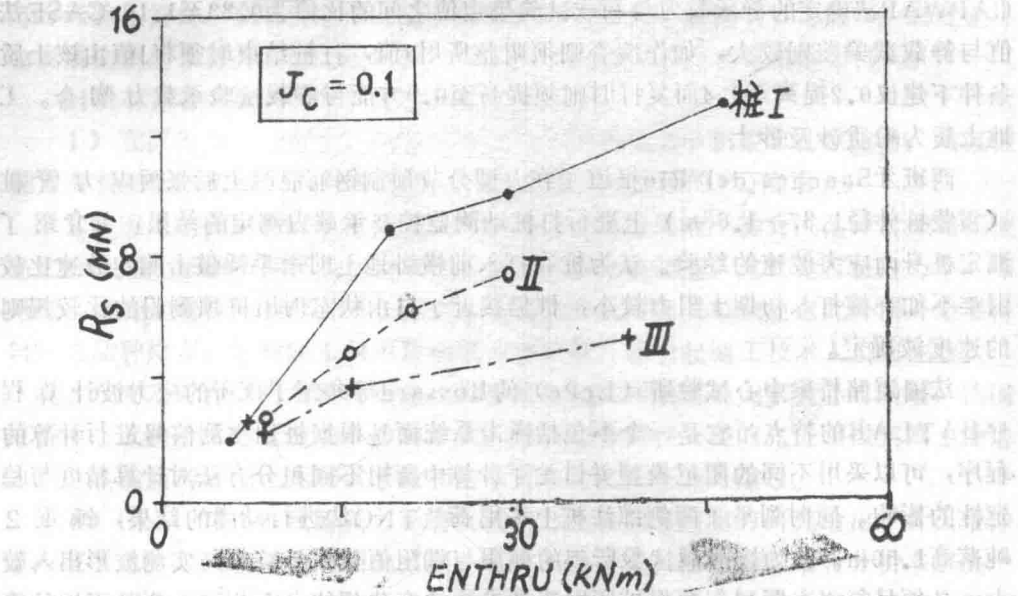


图4 CASE 法静承载力 $R_s$ 与传递能量ENTHRU 的关系（按Seitz）

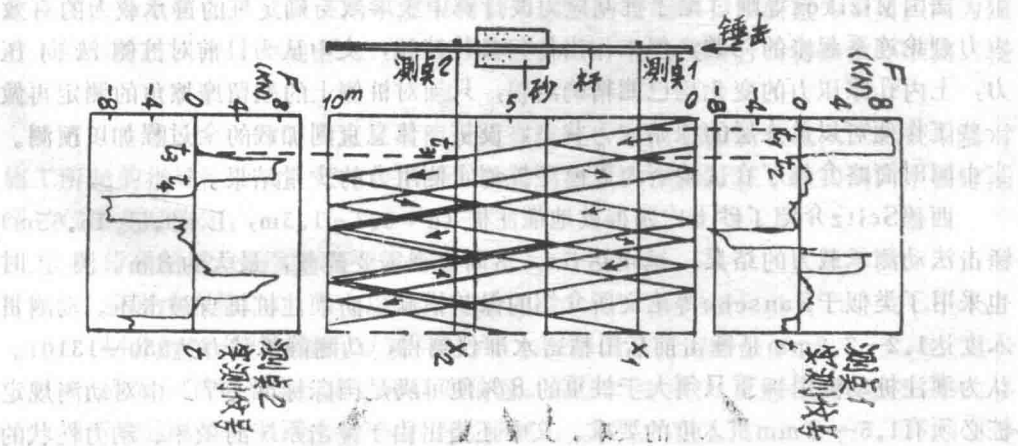


图5 桩侧阻力的试验研究（按MiddendorP等）

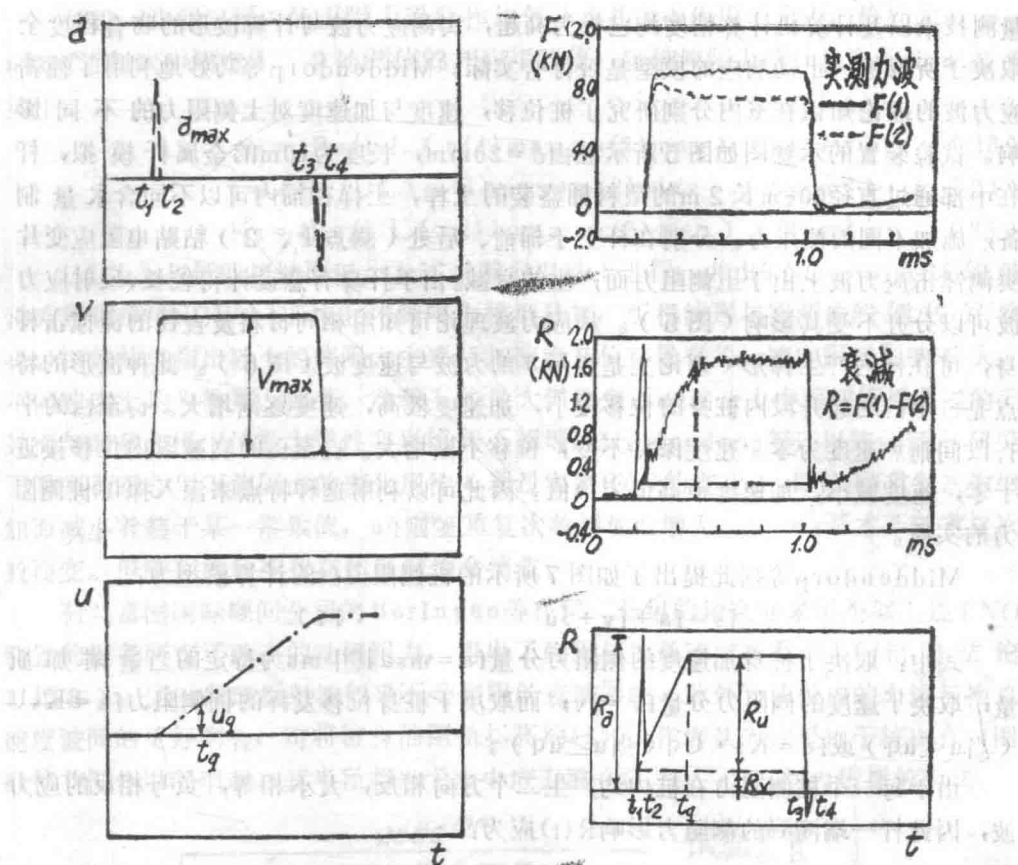


图6 桩侧阻力引起的应力波衰减 (按MiddendorP等)

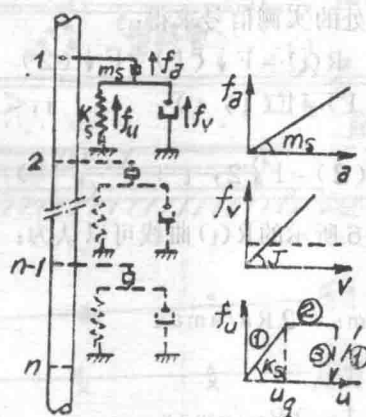


图7 桩侧阻力的计算模型 (按MiddendorP等)

荷兰应用科学研究委员会 (TNO) 建筑材料与结构研究所 (IBBC) 的 MiddendorP等对桩侧阻力的基本研究是本次会议最有启发性的论文之一。由于现代电子

量测技术以及计算机计算精度均已极为高超, 实测应力波与计算波形的吻合程度全取决于所取桩—土动响应的模型是否符合实际。Middendorp等巧妙地利用了撞击应力波的理论知识在室内分别研究了桩位移, 速度与加速度对土侧阻力的不同影响。试验装置的示意图如图5所示桩由 $d=20\text{mm}$ , 长度为 $10\text{m}$ 的金属杆模拟, 杆在中部通过直径 $60\text{cm}$ 长 $2\text{m}$ 的塑料桶盛装的土样, 土样在桶内可以不同含水量制备, 施加不同的侧压力。分别在杆上于桶前、后处(测点1、2)粘贴电阻应变片实测锤击应力波上由于土侧阻力而产生的衰减。由于杆身有意设计得较长, 反射应力波可以分开不受其影响(图5)。从应力波理论可知用相同材料及直径的锤撞击杆身, 可在杆内产生梯形(理论上是矩形)的力波与速度波(图6)。此种波形的特点是 $t_1$ 至 $t_2$ 的起升段内桩身的位移较小, 加速度极高, 速度逐渐增大。 $t_2$ 至 $t_3$ 的平直段内则加速度为零, 速度保持不变, 位移不断增大。 $t_3$ 至 $t_4$ 的衰减段内位移接近于零, 速度减小, 加速度很高但为负值。因此可以利用这种特点来深入探讨桩侧阻力的实质。

Middendorp等据此提出了如图7所示的桩侧阻力 $f_s$ 的计算模型为:

$$f_s = f_a + f_v + J u \quad (14)$$

式中: 取决于桩身加速度的侧阻力分量 $f_a = m s a$ 其中 $m s$ 为待定的当量附加质量; 取决于速度的侧阻力分量 $f_v = J v$ ; 而取决于桩身位移发挥的桩侧阻力 $f_u = K_s U$ (当 $u < u_q$ )或 $f_u = K_s \cdot U_q$ (当 $u \geq u_q$ )。

由于每一个桩侧阻力在桩内均产生二个方向相反, 大小相等, 负号相反的应力波, 因此杆一端测到的侧阻力影响 $R(t)$ 应为:

$$R(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (f_a + f_v + f_u) \quad (15)$$

$R(t)$ 可由测点1及2处的实测信号求得:

$$R(t) = F \downarrow (1) - F \downarrow (2) \quad (16)$$

$$\text{其中: } F \downarrow (1) = F(1, t) \quad t_1 < t < t_2 \quad (17)$$

$$F \downarrow (2) = F(2, t + \frac{X_1 - X_2}{C}) \quad t_3 < t < t_4 \quad (18)$$

根据上述的分析从图6所示的 $R(t)$ 曲线可以认为:

$$\sum_{i=1}^n m s = 2 R a / a_{\max} \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^n J = 2 R v / v_{\max} \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^n K_s = 2 R u / u_{\max} \quad (21)$$

$$u_q = u(t_q) \quad (22)$$

$$m_s = 4Ra/UL (a(1)_{\max} + a(2)_{\max}) \quad (\text{kg/m}^2) \quad (23)$$

$$m_s = 4Ra/UL (a(1)_{\max} + a(2)_{\max}) \quad (\text{kg/m}^2) \quad (23)$$

$$J = 4 R_V / UL (v(1) \max + v(2) \max) (N_s / m^3) \quad (24)$$

$$K_s = 4Ru/UL (u(1)_{\max} + u(2)_{\max}) \quad (N/m^3) \quad (25)$$

UL为土与杆的接触面积。上述试验已用砂土进行,并由TNO——IBBC的波动方程程序TNOWAVE按上述侧阻力模型计算,所得波形与实测曲线能较好吻合。试验结果指出砂土的侧阻力主要与加速度及位移量有关,速度阻尼影响不大,不同速度上均为常数。此外,动载下的最大弹性变形 $u_q$ 由于土中剪切传播范围的差异而与静载作用下的最大弹性变形值并不相等。Middendorp等还以连续锤击研究了重复荷载作用下侧阻力的变化规律(通过实测 $R(t)$ 的变化),即 $K_s$ 随重复次数增加而减小并趋于某一常数值, $u_q$ 则随重复次数增加而增大, $J, m_s$ 基本不随重复次数而变。但所有此种变化在休息后均会消失。

荷兰富国国际顾问公司的 Beringen 等在第二分组的论文亦采用类似上述 TNO 装置的设备研究了砂土的动侧阻力, 得出了侧阻与加载速度关系不大的相同结论 (图 8)。同时发现反射波似乎不受侧阻的衰减影响, 此外为使桩内的力波与换算速度波间的更好吻合, 可将桩身的阻抗提高约 15%。作者认为这里由于桩周有一圈砂柱共同作用所引起。其半径相当于土中应力波在 0、1、 $\pi$  s 时间内传播的距离。

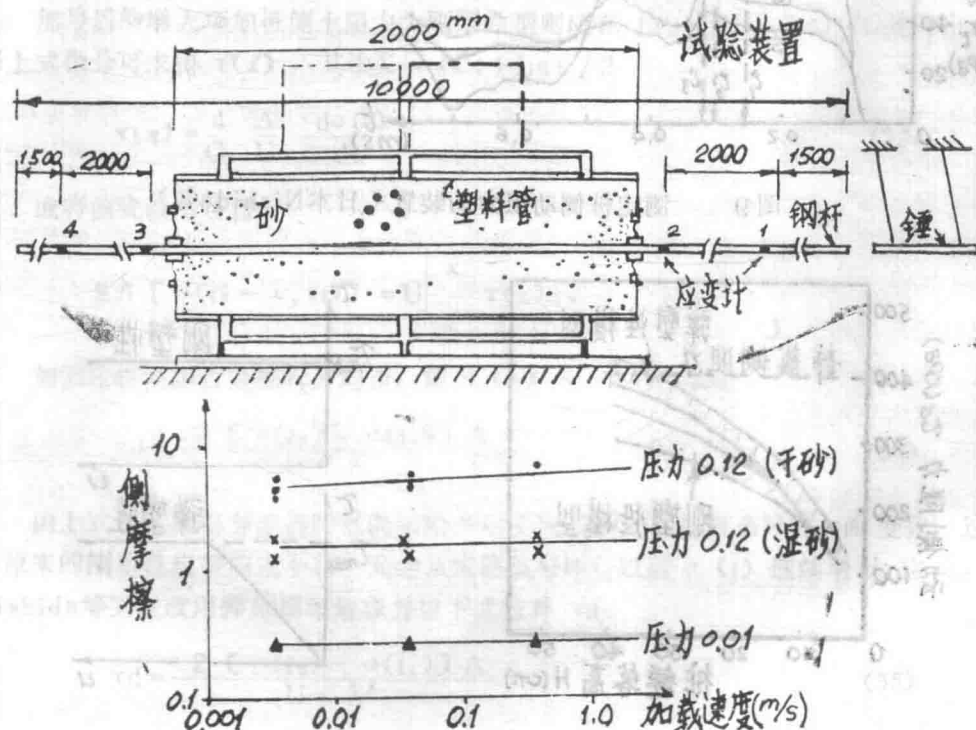


图8 Beringen等的试验及部分成果