

文章编号:1001-5132(2007)03-0388-06

CAPWAP/C 法在低应变反射波法检测中的应用

祝银祥¹, 方崎崎²

(1.杭州浙大网新科技实业投资有限公司,浙江 杭州 310007; 2.浙江省建设厅干部学校,浙江 杭州 310012)

摘要:首先对原应用于高应变测试分析中的 CAPWAP/C 算法进行改进使其适用于低应变反射波法基桩完整性分析,然后利用基于该算法所编制的程序对基桩测试中常见的疑难问题进行了理论模型分析,得到了一些有应用价值的结论,并将其用于指导工程检测实践,取得了较好的效果.

关键词:CAPWAP/C;改进;低应变;桩完整性检测

中图分类号:TU473

文献标识码:A

CAPWAP/C算法是指凯斯桩波动分析程序(连续杆件模型)所采用的算法,它是根据行波理论发展而来的一种计算方法,由美国的Rausche及Goble首次提出^[1,2],在随后的几十年里,虽然由于计算程序所采用土模型有所改变,程序操作界面有所改变,但是这一核心算法却没有变化.该算法用于桩的一维波动分析,具有计算工作量少、精度较高、可分析土的非线性和塑性变形、编程简单等很多优点,因而被国内外多种高应变波形拟合分析软件所广泛采用.近年来,虽然桩承载力的高应变动态测试方法本身受到越来越多的质疑,而变得前景堪忧,但是经过王奎华等人的研究,这一算法的精度较高^[3],完全可以并应该在其他方面得到应用.基于上述思想,本文将该算法用于低应变基桩完整性检测分析,以期对检测工作有所帮助.

1 原算法的不适应之处及改进

CAPWAP/C 算法将桩分成 N 个弹性杆件单

元,取桩的截面积和弹性模量为杆件单元的弹性模量.不同单元的长度值可以不等,但是各单元长度取值必须保证应力波通过各单元的时间 Δt 相等.此外对于每一杆件单元,假定土阻力都作用在单元底部,杆件单元阻抗变化仅发生在单元界面处,弹性波在单元内部不发生畸变,而仅在通过变阻抗单元界面时发生突变.

经过时间间隔 Δt 后,上行波 $p_u(i, j-1)$ 从 i 单元底部传到单元顶部,成为 $p_u(i-1, j)$. 下行波 $p_d(i-1, j-1)$ 从 i 单元顶部传到单元底部,成为 $p_d(i, j)$, 即有:

$$p_u(i, j-1) = p_u(i-1, j),$$

$$p_d(i-1, j-1) = p_d(i, j).$$

不难看出,原算法在变量标识上,第 1 个下标 i 代表桩单元界面结点,第 2 个下标 j 代表时间单元结点,每一个桩单元界面结点只用 2 个变量分别表示上行力波或下行力波.而实际上对于某个界面结点,由于应力波在通过该界面时可能发生突变,所以界面结点两侧的上行波和下行波分量一般

是不同的,因此,首先应当对界面两侧的上下行波进行区分,以便在理解和公式推导时不至于发生歧义,即用 $p_u^+(i,j)$ 表示 j 时刻, i 界面结点上侧的上行波, $p_d^+(i,j)$ 表示 i 界面结点上侧的下行波, $p_u^-(i,j)$ 表示 i 界面结点下侧的上行波, $p_d^-(i,j)$ 表示 i 界面结点下侧的下行波。

另一方面在高应变测试时,加速度传感器和应变传感器均安装在桩侧面距离桩顶一定距离的某处(一般为 1.5~2 倍桩径距离),所以用 CAPWAP/C 法进行高应变拟合分析时,是针对某个单元(一般为第 1 个单元)的底部进行计算分析(并且原算法提供的有关传感器处力波曲线计算公式仅当桩身第 1 单元和第 2 单元阻抗相等时才正确)。而低应变测试时,传感器(加速度计等)是安装在桩顶面测量的,所以必须针对桩顶面进行分析计算。而且由于高应变测试时传感器以上部位是没有桩侧土阻力的,而低应变测试时一般只是桩顶面露出地表,每个桩单元都是有桩侧土阻力的,这些因素都导致了低应变分析与高应变分析是有所不同的。另外,原算法由于标识变量不够,给出的结点速度计算公式欠妥,故有关计算方法及公式必须重新推导以适合于低应变的情况。

2 改进的 CAPWAP/C 法及其主要计算步骤

类似地,将桩身划分为 N 个单元,并同样要求弹性波通过各单元所需时间相同(设为 Δt),各单元自上而下分别编号为 $1,2,\dots,N$ 。各单元之间的界面(可看着结点,包括桩顶面和桩底面)自上而下分别编号为 $0,1,\dots,N$ 。各桩身单元截面声阻抗为 $Z_i(i=1,2,\dots,N)$ 。

桩身单元的第 i 界面结点($i=1,2,\dots,N$),在第 j 个时间结点(时间步长为 Δt)的有关物理量表示如下: $s(i,j)$ 表示结点位移, $v(i,j)$ 表示结点速度, $R(i,j)$ 表示 i 桩身单元所受土阻力(假设集中作用

于单元底部界面结点上),界面结点上、下两侧的上下行波分别用 $p_u^+(i,j), p_d^+(i,j), p_u^-(i,j), p_d^-(i,j)$ 表示。并取下列变量:

$$T_u[i] = Z_i / (Z_i + Z_{i+1}), T_d[i] = Z_{i+1} / (Z_i + Z_{i+1}). \quad (1)$$

容易得到下列关系:

$$p_d^+(i,j) = p_u^-(i-1,j-1), \quad (2)$$

$$p_u^+(i,j) = 2T_u[i]p_u^+(i+1,j-1) + [T_d[i] - T_u[i]]p_d^-(i-1,j-1) + T_u[i]R(i,j), \quad (3)$$

$$p_u^-(i,j) = p_u^+(i+1,j-1), \quad (4)$$

$$p_d^-(i,j) = 2T_d[i]p_d^-(i-1,j-1) + [T_u[i] - T_d[i]]p_u^+(i+1,j-1) - T_d[i]R(i,j). \quad (5)$$

不难验证,由上述公式计算得到界面结点上、下两侧力和结点土阻力构成动态平衡力系:

$$p_u^+(i,j) + p_d^+(i,j) = p_u^-(i,j) + p_d^-(i,j) + R(i,j).$$

如果界面结点没有土阻力,则上式表明界面两侧力相等(满足力连续条件)。

进一步可以得到,界面结点速度表达式(同时可以验证,不论结点是否有土阻力作用,界面上下两侧速度相等也就是界面两侧满足速度或位移连续条件):

$$v(i,j) = (p_d^+(i,j) - p_u^+(i,j)) / Z_i = (p_d^-(i,j) - p_u^-(i,j)) / Z_{i+1} = (2(p_d^-(i-1,j-1) - p_u^+(i+1,j-1)) - R(i,j)) / (Z_{i+1} + Z_i). \quad (6)$$

位移采用速度梯形积分式:

$$s(i,j) = s(i,j-1) + (v(i,j) + v(i,j-1))\Delta t / 2. \quad (7)$$

由于是低应变测试,土阻力采用线性粘弹性模型(线性弹簧与线性粘壶并联):

$$R(i,j) = k[i]s(i,j) + c[i]v(i,j), \quad (8)$$

式中, $k[i], c[i]$ 分别表示 i 桩身单元所对应桩侧土单元对桩身的剪切劲度和阻尼系数。公式(2)~(8)是进行桩的波动分析的基本公式,利用它们可以得到具体用于计算的公式(当前计算的时间结点编号为 j ,凡是时间结点编号为 $j-1$ 的变量均作为已知变量)。

2.1 桩顶面结点

桩顶面是低应变动测时实际操作面,施加的锤

击力和桩响应信号(通常为加速度信号后积分为速度信号)都是在桩顶面进行的,计算分析的顺序也是先从桩顶开始的,设桩顶敲击力 $f(t)$,离散化为 $f(j)$ 为已知(实际使用时一般假设敲击力波形为半正弦波),由于桩顶面结点不受土阻力作用,容易得到所需的计算公式如下:

$$v(0, j) = (f(j) - 2p_u^+(1, j-1)) / Z_1, \quad (10)$$

$$p_d^-(0, j) = f(j) - p_u^+(1, j-1). \quad (11)$$

2.2 桩身中间单元

$$v(i, j) = [2[p_d^-(i-1, j-1) - p_u^+(i+1, j-1)] - k[i][s(i, j-1) + \Delta t v(i, j-1) / 2]] / [Z_{i+1} + Z_i + c[i] + k[i]\Delta t / 2]. \quad (12)$$

结点位移 $s(i, j)$ 可用公式(7)、(8)和(2)~(5)来计算.

2.3 桩底面结点

设桩底土对桩底的粘滞阻尼系数为 C_{toe} , 弹簧系数为 K_{toe} . 并令 $C_{total} = C_{toe} + c[N]$ 和 $K_{total} = K_{toe} + k[N]$ 则有

$$v(N, j) = (2p_d^-(N-1, j-1) - K_{total}(s(N, j-1) + \Delta t v(N, j-1) / 2)) / Z_{N1} + C_{total} + K_{total}\Delta t / 2, \quad (13)$$

$$s(N, j) = s(N, j-1) + (v(N, j) + v(N, j-1))\Delta t / 2, \quad (14)$$

$$p_u^+(N, j) = -p_d^-(N-1, j-1) + K_{total}s(N, j) + C_{total}v(N, j). \quad (15)$$

3 计算分析与讨论

基于上述计算方法,编制了低应变反射波法完整性分析计算程序,本文采用该程序进行了计算分析得到了一些富有启发性的结论.

3.1 桩侧土剪切劲度的影响

图 1 反映了桩侧土剪切劲度对完整桩(桩身截面阻抗均匀)桩顶速度响应曲线的影响,从图 1 可以看出,当桩侧土剪切劲度较小时,桩顶响应曲线为通常所见到的较标准的反射波曲线,但是随着剪

切劲度的逐渐增大,曲线前部逐渐上抬,后部逐渐下压,当剪切劲度进一步增大时,曲线总体呈现低频振荡的形状.就多数工程的基桩而言,由于桩侧土土质一般都不太好,桩侧土剪切劲度尚不会大到使桩顶响应曲线发生振荡的程序,但是在某些情况下,却完全有可能如此.比如在浙江省的金华、义乌以及建德等地山区,由于基岩埋深较浅(一般不到 10 m),基岩面有常有较大起伏,上覆土层一般为可塑—硬塑残积含碎石粘性土层及强风化基岩,土性较好.为防止不均匀沉降,人工挖孔桩被广泛采用.在这些工程基桩检测中发现,相当多的桩测试曲线呈现出振荡的形状.图 2 给出了建德某工程人工挖孔桩的 1 幅较典型的实测曲线,对于这种测试曲线,如果不能充分认识到桩侧土剪切劲度的影响,容易发生误判.误判的可能主要有 2 种,一是误将曲线振荡的波谷(图 1 曲线下凹处)作为缺陷位置判断;二是误将波谷作为桩尖反射而认为桩长过短.所以这类桩在检测和分析时应当特别注意.

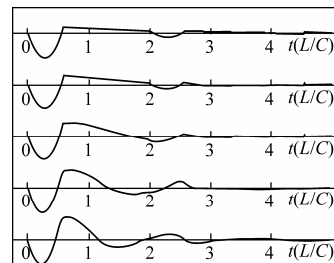


图 1 桩侧土剪切劲度对桩顶速度响应曲线影响

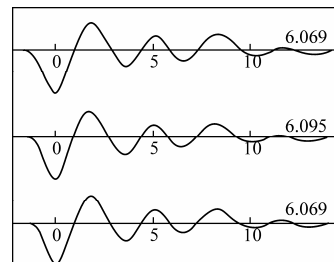


图 2 浙江建德某工程人工挖孔桩实测曲线

3.2 桩尖土对桩尖反射特征的影响

首先来看一下桩尖土压缩刚度的影响,从图 3 可以看出,随桩尖土刚度由小到大变化,速度响应曲线上桩尖反射脉冲方向也由与入射波同向逐渐过度到与入射波反向,这一点早已为文献[4-7]证实.

需要补充说明的是,当桩尖反射特征介于完全同向和完全反向之间的过度状态时(图3的第3条曲线),采用“峰—峰”法计算桩尖反射时间,如用同向峰(图3中A点)计算得到时间则偏小(相应的得到的桩波速偏大或桩长偏短),如用反向峰(图3中B点)计算得到时间又偏大(相应得到的桩波速偏小或桩长偏长)。而且桩越短,敲击脉冲越宽(敲击设备越软),这种误差也越大,这一点已经通过尼龙棒试验予以证实(通过改变尼龙棒底端的支撑条件,如悬空、垫橡胶、垫木地板、垫混凝土地板)。因此对短桩桩端土较好情况时应注意这种影响。

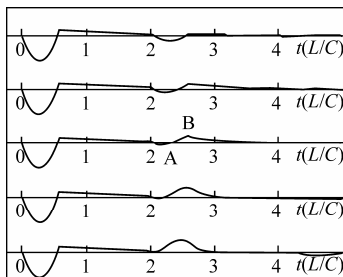


图3 桩侧土压缩刚度对桩顶速度响应曲线影响

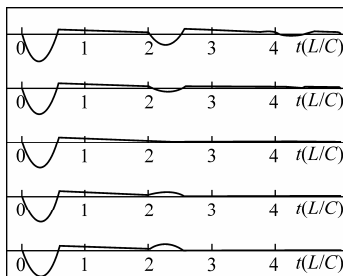


图4 桩尖土阻尼对桩顶速度响应曲线影响

其次,从桩底土阻尼对桩顶速度响应曲线的影响(见图4),不难看出,随桩底土阻尼的增大,速度响应曲线上桩尖反射方向也由与入射波同向逐渐过度到与入射波反向,但与桩底土压缩刚度不同,桩底土阻尼的变化,基本不改变桩尖反射峰值的位置,而仅改变其幅值。特别应当指出的是,当桩尖土阻尼(CASE)阻尼系数等于1时,则不再出现桩尖反射信号,这一点希望引起注意,因为在目前的国家行业桩基检测规范要求,I类桩测试曲线必须要有较明显的桩尖反射信号,现在看来这一要求可能不够合理。

3.3 桩头大小的影响

图5中的5条曲线显示了桩头(取2个单元长度)阻抗大小对桩顶速度响应曲线的影响。从上到下5条曲线,对应桩头阻抗与正常桩身阻抗之比分别为0.25、0.5、1、2、4,从图5可以看出,当桩头阻抗很小时(0.25),桩顶速度响应曲线呈较高频衰减振荡形状,当桩头阻抗为正常桩身阻抗的0.5倍时,振荡趋势很小,显示出所谓“反冲”较大的特征。而当桩头阻抗于正常桩身阻抗时,曲线呈现缺陷桩曲线特征,当桩头阻抗达到正常桩身阻抗的4倍(桩头直径大于正常桩身直径1倍)时,曲线呈现出典型“断桩”曲线特征。在实际检测工作中由于各种原因常常导致桩头截面尺寸与原正常桩身的截面尺寸不一致,比如由于凿桩不当或其他桩头处理不符合要求使得测试时桩顶面尺寸小于正常桩身,这时测试曲线前部经常会出现振荡,此时务必要重新处理桩头直到符合要求为止,否则容易误判。另外一方面,某些情况下,由于桩顶标高附近土层为粉土或砂性土,钻孔灌注桩在这一深度容易出现扩颈,而导致实际测试时,出现桩头阻抗比正常桩身阻抗大的情况,这时测试曲线上就会出现类似“缩颈”的信号,因此当出现这种情况时,应当对被测桩的桩顶面尺寸进行仔细测量,以区别是真正缩颈,还是由于桩头过大造成的相对“缩颈”。根据实际工程检测经验,这种情况还是常常会遇到的。

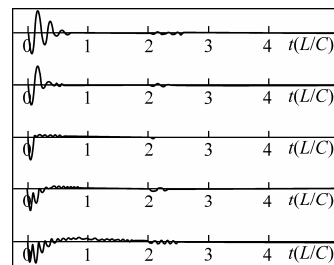


图5 桩头大小对桩顶速度响应曲线影响

3.4 桩身阻抗渐变的影响

图6表示了桩身阻抗从“突变—突变”到“渐变—渐变”对桩顶速度响应曲线的影响。

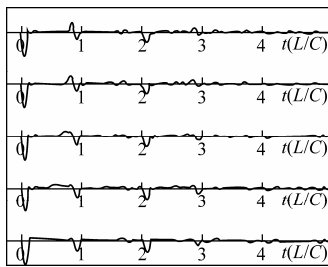


图6 桩身阻抗渐变对桩顶速度响应曲线影响

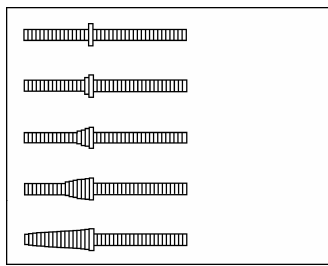


图7 阻抗渐变“突变—突变”到“渐变—突变”

图7显示了相应的桩身阻抗变化情况,由图7可见,当桩身某单元阻抗发生突然变化(增大)时,响应曲线上相应位置出现了典型的扩颈反射特征,但是随着扩颈过程由突变逐渐变为渐变(同时扩颈后突然收缩为正常桩身直径),则扩颈反射特征逐渐变弱直至基本消失,但是缩颈特征仍然明显(图6中第5条曲线,此时单纯从测试曲线判断则很容易出现误判,这也正是反射波法完整性检测方法的局限和弱点。对于这种情况确实难以判断,在进行曲线分析时,应结合施工情况,如桩充盈系数的大小,灌注时的单位深度混凝土用量,对于检测人员,既不能因为情况复杂缩手缩脚不敢判断,而把这些有怀疑的桩均当成好桩,也不能不分青红皂白,将这些桩均判成严重缺陷桩而导致不应有的损失,当测试曲线较普遍出现这种情况时,应当先选择部分较典型的桩进行钻孔取芯或开挖验证等其他测试手段,再作进一步处理。

对于桩身阻抗从“突变(缩颈)—突变(扩颈)”到“渐变(缩颈)—突变(扩颈)”的情况,对速度响应曲线的影响也是类似的,这里不再重复。

此外,该分析方法及程序还可用于一般测试曲线的反演拟合分析,对于地质条件较为均一的情况,桩身缺陷的定量化判别具有一定的参考作用。

4 结语

本文对原用于高应变拟合分析的CADWAP/C算法进行了改进,将其应用到低应变反射波法的检测分析中,通过一些实际算例,对基桩检测中的相关问题进行了理论分析计算,并结合工程检测实践,对一些疑难问题或重要而又易忽视的问题进行了研究,得到了如下一些有价值的结论:

(1) 对于基岩埋深较浅(一般只有几米)地区所采用的人工挖孔桩(或其他类型桩)由于桩侧土土性较好,桩侧土剪切刚度较大,往往会使得反射波法测得的桩顶速度响应曲线呈衰减振荡形状,此时应注意,不能误将振荡的峰(谷)当成桩身缺陷或桩底反射位置,否则容易造成误判。

(2) 对于桩端土层较好情况下,桩尖反射特征介于桩端自由(桩底反射与入射波同相)和完全固定(桩底反射与入射波反相)之间,而兼有二者的特征。此时如采用同相反射峰位置计算桩长则偏短,用反相反射峰位置计算桩长则偏长,反过来若用来计算波速则所得结果与上述情况相反。特别对于桩长较短的桩,这种影响是必须要考虑的。

(3) 桩头大小及是否完整对于测试曲线有着重要影响,对反射波法而言,桩头截面阻抗是基本参考点,桩身缩(扩)颈都是相对桩头而言的,当桩头尺寸小于正常桩身尺寸时,测试曲线前部会出现振荡或所谓“反冲”较大的特征,这对于浅部缺陷的识别有着较大的干扰作用。反之如桩头尺寸大于正常桩身尺寸,则测试曲线会表现出浅部有缩颈甚至断桩的假象。因此在现场测试时,应注意量测桩头尺寸(特别对于有怀疑的桩),以免导致漏判或误判。

(4) 应当注意“桩截面渐变”的影响,虽然这种情况并不多见,但也会存在。由于反射波方法的先天缺陷,对于桩截面阻抗缓慢变化的情况是很难反映的,所以应当注意由于桩截面阻抗渐变造成的“伪扩颈”。因此在复杂情况下,不能单纯以测试

曲线作为惟一判断依据,还应当结合施工情况如充盈系数及地质资料等进行综合分析判断.以尽量提高测试分析结果的可靠性.

参考文献:

- [1] 徐攸在,刘心满.桩的动测新技术[M].北京:中国建筑工业出版社,1989.
- [2] Rausche F, Moses F, Goble G G. Soli resistance predications from pile dynamics[J]. J of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1972, 98(9):917-937..
- [3] 王奎华.基桩波动方程答朗贝尔解法精度研究[J].岩土工程学报,1997,21(6):617-620.
- [4] 王奎华,谢康和,曾国熙.有限长桩受迫振动问题解析解及其应用[J].岩土工程学报,1997,19(6):27-35.
- [5] 王奎华,谢康和,曾国熙.变截面阻抗桩受迫振动问题解析解及应用[J].土木工程学报,1998,31(6):56-67.
- [6] 王奎华.成层广义Voigt地基中粘弹性桩的纵向振动分析与应用[J].浙江大学学报:工学版,2002,36(5):565-571.
- [7] 王奎华.多元件粘弹性土模型条件下桩的纵向振动特性和时域响应[J].声学学报,2002,27(5):455-464.

Modified CAPWAP/C and its Application in Low Strain Integrity Testing

ZHU Yin-xiang¹, FANG Qi-qi²

(1.Hangzhou Insigma Technology Industry Investment Co. Ltd, Hangzhou 310007, China; 2.The Training School of the Construction Bureau of Zhejiang, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The CAPWAP/C is modified to be suitable for integrity analysis on low strain pile. A new program is developed based on the modified CAPWAP/C, with which some analysis is conducted on the problems commonly encountered through theoretical modeling. Some valuable conclusions are reached and thus can serve as the useful references in guiding engineering tests and practice, and the application results are satisfactory.

Key words: CAPWAP/C; modification; low strain; pile integrity testing

CLC number: TU473

Document code: A

(责任编辑 史小丽)