

文章编号:1007-6492(1999)03-0035-04

超声波检测桩基质量的模糊综合分析

袁群¹, 李斌², 耿晔², 王海明²

(1. 大连理工大学土木工程系, 辽宁 大连 116024; 2. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003)

摘要: 桩基础由于具有承载能力高、抗震性能好等优点在工程中得到广泛使用,但同时,桩基础作为隐蔽工程,施工质量也难以很好控制,由于桩基质量低劣而引发的工程事故时有发生。因此,提高桩基检测分析水平,查明桩内缺陷是工程安全与耐久的前提。在现有超声波测桩分析方法中,还没有充分考虑不同程度的缺陷对超声波声速、频率和振幅的影响,相应的判断缺陷的方法比较笼统。鉴于此,利用抽样分布定理求出超声波声速、频率及振幅的期望和方差的置信区间,并在此基础上给出超声量属于“好”、“一般”、“差”的隶属函数,用模糊综合评判的方法对超声波检测桩基的质量进行分析,分析结果表明,该方法能充分利用超声信号的变化,准确判断桩内缺陷。

关键词: 桩基; 超声波; 抽样分布; 模糊综合评判

中图分类号: TB 517; TU 473 **文献标识码:** A

目前,利用超声波检测大直径($d \geq 0.6$ m)桩基础的质量已成为一种普遍使用的方法。一般情况下,如果桩内混凝土存在空洞、夹泥、离析、裂缝等缺陷时,超声信号的声速、频率和振幅都会发生变化。在具体确定混凝土缺陷时,通常的做法是求出超声量的统计参数均值和样本标准差,然后以超声量的小概率值作为区别桩身混凝土有无缺陷的临界判断依据。但是,如此采用超声量有限个值的样本均值和样本标准差,来替代桩作为一个连续介质而对应的超声量有无穷多个值的总体期望和均方差,有一定的局限性^[1]。因此本文利用抽样分布定理给出超声量的期望与均方差的置信区间,然后据此组合给出超声量的组合区间值及其属于“好”、“一般”、“差”3个评语的隶属函数,并且依据超声声速、频率和振幅对混凝土不同缺陷的反应程度给出相应的权重,最后对桩身不同截面处的混凝土质量作出模糊综合评判。

1 超声量的置信区间分析

1.1 期望的置信区间分析

沿桩身检测孔水平同步或高差同步检测得到的超声量 ξ_i (ξ_i 代表超声声速 V_i 、频率 f_i 和振幅

A_i 的平方根, $i = 1, 2, 3, \dots, n$) 是来自正态总体 $N(E\xi, \sigma^2)$ 的一个样本,由抽样分布定理,得到如下分布^[2,3]

$$T = \frac{\bar{\xi} - E\xi}{S_{\xi}} \sqrt{n} \sim t(n-1), \quad (1)$$

对于给定的 α , 存在分位数 $t_{1-\alpha/2}(n-1)$, 满足

$$P\{\bar{\xi}_d \leq E\xi \leq \bar{\xi}_u\} = 1 - \alpha. \quad (2)$$

其中, $\bar{\xi}_d = \bar{\xi} - t_{1-\alpha/2}(n-1) S_{\xi} / \sqrt{n}$;

$$\bar{\xi}_u = \bar{\xi} + t_{1-\alpha/2}(n-1) S_{\xi} / \sqrt{n}.$$

式中: $\bar{\xi}$ 为超声量样本 ξ_i 的均值; S_{ξ} 为超声量样本 ξ_i 的均方差; $1 - \alpha$ (α 通常取 0.05) 为置信水平,那么 $\bar{\xi}_d \leq E\xi \leq \bar{\xi}_u$ 就是 $E\xi$ 的置信区间。

1.2 均方差的置信区间分析

同样,由抽样分布定理可以得到如下分布:

$$\Omega = \frac{(n-1)S_{\xi}^2}{\sigma^2} \sim \chi^2(n-1). \quad (3)$$

对于给定的 α , 存在分位数 λ_1, λ_2 , 使

$$P\{S_{\xi_d}^2 \leq \sigma^2 \leq S_{\xi_u}^2\} = 1 - \alpha, \quad (4)$$

其中,

$$S_{\xi_d}^2 = (n-1)S_{\xi}^2/\lambda_2; S_{\xi_u}^2 = (n-1)S_{\xi}^2/\lambda_1;$$

$$\lambda_1 = \chi_{1-\alpha/2}^2(n-1); \lambda_2 = \chi_{\alpha/2}^2(n-1).$$

收稿日期:1999-01-15; 修订日期:1999-04-27

基金项目:水利部水利技术开发基金资助项目(SJ9610)

作者简介:袁群(1966-),男,河南省新乡市人,大连理工大学博士研究生,高级工程师,主要从事结构及桩基工程的检测、分析与评估方面的研究。

$1 - \alpha$ 为置信水平, 那么 $S_{\xi} \leq \sigma \leq S_{\xi}$ 就是 σ 的置信区间。

1.3 超声量组合区间的划分

通常判别桩身混凝土缺陷的方法是取超声量的小概率值 $\xi - 2S_{\xi}$ 作为临界判据, 这是以样本均值 ξ 和均方差 S_{ξ} 接近 $E\xi$ 和 σ 为前提的, 然而实际情况是, 当对一根桩进行检测时, 所得超声量的样本均值 ξ 和均方差 S_{ξ} 是变化不确定的, 如果将它们作为置信水平 $1 - \alpha$ 下的区间值考虑应更合理可信, 但是此时临界判据就不是确定的唯一值, 而可以有多种组合变化, 这里本文依据严格程度不同给出超声量的 3 个临界判据 ξ_{01} , ξ_{02} 和 ξ_{03} , 相应超声量被划分成 4 个区间, 在每个区间里对应的混凝土质量是不同的。

I 区间 $\xi > \xi_{01}$, II 区间 $\xi_{02} < \xi \leq \xi_{01}$,
III 区间 $\xi_{03} < \xi \leq \xi_{02}$, IV 区间 $\xi \leq \xi_{03}$ 。
其中, $\xi_{01} = \bar{\xi}_u - 2S_{\xi_u}$; $\xi_{02} = \bar{\xi} - 2S_{\xi}$; $\xi_{03} = \bar{\xi}_d - 2S_{\xi_d}$ 。

2 模糊综合评判分析

超声声速、频率和振幅是超声波检测混凝土质量的 3 个基本物理量, 由其作为模糊评判的单因素组成的论域为^[4,5]

$U = \{\text{声速, 频率, 振幅}\}$;

桩内混凝土的质量可以分成“好”、“一般”和“差”3 个等级, 其组成的评语论域为

$V = \{\text{好, 一般, 差}\}$ 。

因此可以建立 3 个单因素对论域 V 的隶属函数, 形成模糊关系矩阵

$$R = \begin{pmatrix} \mu_{r1}(v) & \mu_{r2}(v) & \mu_{r3}(v) \\ \mu_{f1}(f) & \mu_{f2}(f) & \mu_{f3}(f) \\ \mu_{\sqrt{A}1}(\sqrt{A}) & \mu_{\sqrt{A}2}(\sqrt{A}) & \mu_{\sqrt{A}3}(\sqrt{A}) \end{pmatrix} \quad (5)$$

混凝土的超声声速、频率和振幅平方根对判断桩身混凝土质量的重要程度的权重组成的模糊向量为

$$\pi = (\pi_{1i})_{1 \times 3}, \quad (6)$$

其中,

$$0 \leq \pi_{1i} \leq 1, \quad i = 1, 2, 3.$$

则可以通过模糊变换

$$Y = \pi \cdot R \quad (7)$$

其中,

$$Y = (Y_{1j})_{1 \times 3}, Y_{1j} = \bigvee_{i=1}^3 (\pi_{1i} \wedge r_{ij})$$

万方数据

得到对桩身混凝土质量“好”、“一般”和“差”的综合评判结果。

超声量 ξ (代表声速、频率和振幅平方根) 评价混凝土质量“好”、“一般”和“差”3 个等级的隶属函数可分别采用升半梯型、三角形和降半梯型分布, 见式(8), (9), (10)。

$$\mu_{\xi 1}(\xi) = \begin{cases} 0 & (\xi \leq \xi_{02}) \\ 1 + (\xi - \xi_{01}) / (\xi_{01} - \xi_{02}) & (\xi_{02} < \xi < \xi_{01}) \\ 1 & (\xi \geq \xi_{01}) \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu_{\xi 2}(\xi) = \begin{cases} 0 & (\xi \leq \xi_{03}) \\ 1 + (\xi - \xi_{02}) / (\xi_{02} - \xi_{03}) & (\xi_{03} < \xi \leq \xi_{02}) \\ 1 - (\xi - \xi_{02}) / (\xi_{01} - \xi_{02}) & (\xi_{02} < \xi < \xi_{01}) \\ 0 & (\xi \geq \xi_{01}) \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_{\xi 3}(\xi) = \begin{cases} 1 & (\xi \leq \xi_{03}) \\ 1 - (\xi - \xi_{03}) / (\xi_{02} - \xi_{03}) & (\xi_{03} < \xi < \xi_{02}) \\ 0 & (\xi \geq \xi_{02}) \end{cases} \quad (10)$$

3 实例计算分析

3.1 基本情况及计算结果

一试验桩, 桩长 11.0 m, 桩径 800 mm, 混凝土强度等级为 C20, 超声埋管间混凝土净距 550 mm, 在距桩顶 0.2 m 和 4.6 m 处设置缺陷 I 和缺陷 II, 其中缺陷 I 比较严重, 检测仪器为 CTS-25 型非金属岩体超声波仪, 检测采用水平同步法, 测线间距 400 mm, 检测时, 发射电压档、增益档和衰减档分别设置在 200 V、1.5 及 15 dB, 采用 1.2 节中的方法, 计算得到

$$\begin{aligned} V_{01} &= 4.551 \text{ km/s}, & V_{02} &= 4.374 \text{ km/s}, \\ V_{03} &= 4.123 \text{ km/s}, \\ f_{01} &= 26.534 \text{ kHz}, & f_{02} &= 23.175 \text{ kHz}, \\ f_{03} &= 18.442 \text{ kHz}, \end{aligned}$$

$$\sqrt{A_{01}} = 2.854, \sqrt{A_{02}} = 2.529, \sqrt{A_{03}} = 2.071.$$

当权重模糊向量取为 $\pi = (1/3, 1/3, 1/3)$ 时, 计算得到沿桩身每一测点处混凝土上的综合评判结果, 见图 1。由图 1 可以看到桩中 5 个位置的超声声速、频率和振幅平方根所在的范围, 见表 1。

表 1 超声量异常点位的统计

位置/m	0.2	4.6	5.0	6.6	10.2
波速	IV	I	I	I	I
频率	I	III	I	I	II
振幅平方根	II	III	II	II	I

说明: I、II、III、IV 指超声量落入 1.3 节划分的区间。

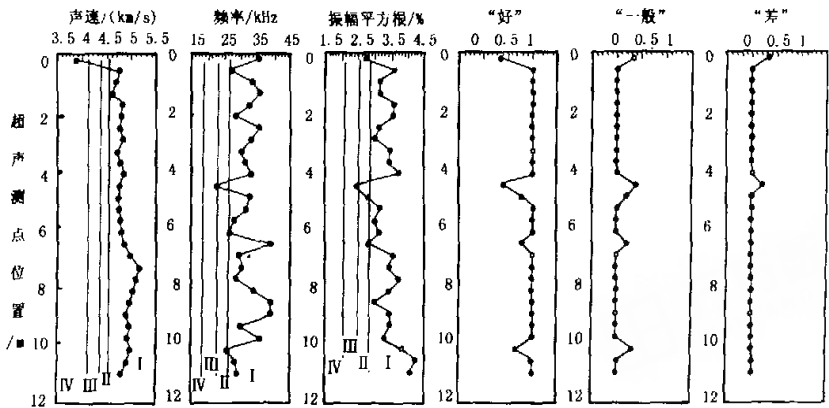


图1 试验桩各个测点处的超声量及评价

第1点位置在0.2 m处,第12点在4.6 m处,第13点在5.0 m处,第17点在6.6 m处,第26点在10.2 m处.

进一步可以得到不同权重模糊向量时的综合评判结果,见表2.

表2 不同权重模糊向量时的综合评判结果

权重	位置/m	评判结果 \bar{Y}	评价
$\pi = (\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$	0.2	(0.333, 0.333, 0.333)	差
	4.6	(0.387, 0.387, 0.225)	一般
	5.0	(0.791, 0.209, 0.000)	好
	6.6	(0.791, 0.209, 0.000)	好
	10.2	(0.672, 0.328, 0.000)	好
权重	位置/m	评判结果 \bar{Y}	评价
$\pi = (0.4, 0.3, 0.3)$	0.2	(0.300, 0.300, 0.400)	差
	4.6	(0.458, 0.343, 0.199)	好
	5.0	(0.834, 0.166, 0.000)	好
	6.6	(0.834, 0.166, 0.000)	好
	10.2	(0.732, 0.268, 0.000)	好
权重	位置/m	评判结果 \bar{Y}	评价
$\pi = (0.3, 0.4, 0.3)$	0.2	(0.400, 0.300, 0.300)	好
	4.6	(0.343, 0.458, 0.199)	一般
	5.0	(0.834, 0.166, 0.000)	好
	6.6	(0.834, 0.166, 0.000)	好
	10.2	(0.732, 0.268, 0.000)	好
权重	位置/m	评判结果 \bar{Y}	评价
$\pi = (0.3, 0.3, 0.4)$	0.2	(0.379, 0.337, 0.284)	好
	4.6	(0.343, 0.458, 0.199)	一般
	5.0	(0.834, 0.166, 0.000)	好
	6.6	(0.834, 0.166, 0.000)	好
	10.2	(0.732, 0.268, 0.000)	好

3.2 计算结果分析

计算结果表明,模糊评判结果与权重模糊向量的取值关系比较密切,如果权重模糊向量取值不当,评判结果就大相径庭.例如,该算例中,

0.2 m处在不同权重模糊向量下的评判结果就正好相反.另外发现,仅个别超声量偏低至Ⅱ区时,评判结果仍属于“好”.如果某超声量偏低至Ⅲ区,且相应的权重不小于其它超声量的权重时,评判结果就给出“一般”.如果某超声量偏低至Ⅳ区,相应权重也不小于其它超声量的权重时,评判结果就给出“差”.此算例中,分析结果与实际情况符合较好的是权重模糊向量取 $\pi = (1/3, 1/3, 1/3)$.

从理论上讲,混凝土中的缺陷都会引起超声声速、频率及振幅的变化,但实际检测结果并不都是如此,有时缺陷仅能影响某一个或某两个超声参量的异常变化,这种变化的不协调性就给分析带来一定困难.但是实践表明,混凝土缺陷引起超声量的变化还是有规律可循.当超声声速明显变小时,混凝土中必有大的缺陷,而小的混凝土缺陷则对声速影响不大.相对而言,超声频率、振幅对混凝土缺陷反应就比较敏感,这种特性对检测混凝土中的小缺陷有利.

鉴于上述分析,采用模糊综合评判方法分析桩基质量时,应注意下面几点:

(1) 桩基上部质量的好坏尤为重要,因此将上部所有大、小缺陷分析出来非常必要,此时权重模糊向量可取 $\pi = (1/3, 1/3, 1/3)$.

(2) 不论在什么部位,大的混凝土缺陷对桩的安全性影响都比较重要,而深部的小缺陷影响就比较小,因此为避免次要问题干扰,可选择超声声速权重大的权重模糊向量.如本例中,4.6 m处,当 $\pi = (0.4, 0.3, 0.3)$ 时,评判结果为“好”.这样可以避免工程技术人员对桩身质量产生不必要的担心,加快施工进度,减少投入.

(3) 对单桩单柱的工程桩,应用上述方法综合分析,查清桩内缺陷.

4 结束语

在超声波测桩中,由于超声测线的布置数量有限,得到的超声量样本均值和标准差距各自的真值仍有一定的距离,因此根据超声量样本均值和标准差制定的单一的混凝土缺陷判别依据有一定的局限性.针对这种情况,本文利用抽样分布定理,给出了超声量期望和方差的置信区间及多个临界判据值,进而详细区分了混凝土处于“好”、“一般”、“差”3种质量状态,最后,用模糊综合评价的方法成功地对桩基的质量进行了判断分析.

参考文献:

- [1] 袁 群.当议超声波检测桩基质量的分析[A].刘金砺.桩基工程技术[C].北京:中国建材工业出版社,1996.617-621.
- [2] 汪荣鑫.数理统计[M].西安:西安交通大学出版社,1987.
- [3] 数学手册编写组.数学手册[M].北京:高等教育出版社,1984.
- [4] 贺仲雄.模糊数学及其应用[M].天津:天津科学技术出版社,1983.
- [5] 汪培庄.模糊集合论及其应用[M].上海:上海科学技术出版社,1986.

Fuzzy Synthetic Analysis for the Detection of Pile Foundation's Quality by Means of Ultrasonic Wave

YUAN Qun¹, LI Bin², GENG Ye², WANG Hai-ming²

(1. Department of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Pile foundation is widely used owing to its high bearing capacity and good resistance to earthquake. But, as embedded construction, its quality can't be controlled efficiently and as a result of poor quality of piles project failures occurred occasionally. Therefore defects in piles must be ascertained for project's safety and durability. In available test methods by ultrasonic wave, it is not considered yet that defects in varying degrees affect the ultrasonic wave velocity, frequency and amplitude of vibration, and corresponding methods in detecting defects are rather too sweeping. For this reason, the confidence intervals of expected values and variances in ultrasonic parameters are calculated by sampling distribution theorem in this paper. And then the ultrasonic parameter attaching functions of "well" or "general" or "poor" grade are given, and the quality of piles tested by ultrasonic wave is analyzed by means of fuzzy synthesis judgement. Analyses show that the fuzzy synthesis judgement method can make full use of information of ultrasonic wave to detect accurately pile defects.

Key words: pile foundation; ultrasonic wave; sample distribution; fuzzy synthetic judgement