

混凝土中超声波波速特征检验研究

张永乐^{1,2} 杨建超³ 唐德高¹

(1.解放军理工大学工程兵学院,江苏 南京 210007;2.江苏省建苑岩土勘测有限公司,江苏 南京 210029;
3.洛阳水利工程研究所,河南 洛阳 471023)

摘要 采用超声波检测仪对一批预制混凝土试块进行对测,通过 χ^2 检验法对原始资料进行正态分布检验,并检验正态分布的一致性.检验结果表明,超声波在无缺陷混凝土中传播规律服从正态分布,即可将试验的数学平均值作为总体样本的数学期望值,从而减少试验工作量,揭示超声波在混凝土中的传播规律.

关键词 超声波;混凝土试块; χ^2 检验法;概率法;正态分布

中图分类号 :TU502+.4 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2008)03-0371-04

声波透射法检测混凝土质量由于具有适应性强、检测灵敏度高、对人体无害、设备轻巧、成本低廉、可及时得到探测结果、适合在实验室及野外等各种环境下工作等优点被广泛采用.目前采用声波透射法检测混凝土质量,主要方法包括概率法、斜率法和多因素综合分析法^[1-3],其中概率法应用最多^[4-5],也是目前现行桩基检测规范中采用的方法^[6-7].

概率法是最先提出的一种判断混凝土内部质量缺陷的方法.文献[3]指出,概率法的基本思想是认为正常混凝土质量波动是偶然误差所引起,是不可避免,也是允许的,同时粗略认为正常混凝土的声学参数服从正态分布.缺陷是由过失误差(漏振、漏浆、架空、夹泥等)引起,它的声学参数分布不服从正态分布.

如果在一定样本工况下,混凝土试块质量检测的声学参数服从正态分布,就没有必要进行更多的试验,可将试验的数学平均值作为总体样本的数学期望值,这对减少试验次数,揭示超声波在混凝土中的传播规律具有指导意义.

声波透射法检测混凝土质量主要涉及的声学参数有声速、波幅、频率以及波形.声速是声波透射法检测的超声波在混凝土中的传播速度,其与混凝土弹性性质、内部结构有关,且相应的检测技术表明,声速的测量较其他声学参数的测量更为准确,故本文将声速作为研究对象.

1 基本原理

若某一剖面有 n 个测点,如果某个低测值点是属于正常的质量波动所引起,那么,它出现的概率应当大于或等于 $1/n$.如果这个低测值小于缺陷临界值,则它出现的概率必低于 $1/n$.概率低于 $1/n$ 的含义是:在正常波动情况下,这样的点一个也不允许出现.缺陷临界值的计算如下:

$$x_{L1} = \bar{x} - k_{aL1} S \quad (1)$$

式中: x_{L1} ——缺陷临界值; $\bar{x}$ ——检测样本平均值; k_{aL1} ——概率为 $1/n$ 的分位值; S ——检测样本标准差.

根据式(1)的计算,参与统计的声学参数样本中,低于 x_{L1} 的值均属于缺陷异常值.同时还考虑到在实际结构中,缺陷往往有一定的尺寸,因此按一定间距逐点测量,不但可能测到单个的缺陷点,还可能测到相邻的缺陷点.假定混凝土侧面上某测点 A 的声波测值小于或等于某一临界值 x_{L1} (即缺陷)出现的概率^[8]为 p ,与其相邻的 B 点测值也应小于或等于 x_{L1} .这种2点同时小于或等于 x_{L1} 的情况构成概率论中的事物相容事件,其出现的概率 P 为单个事件概率 p 之积,即 $P = p^2$.由于声波透射法的测点是上下布置的,则相邻点出现的概率应为 $2p^2$.把这种情况的界限概率 P 定为与概率 $1/n$ 相应的分位值,即这样的情况一个也不应该出现,

则界限概率为

$$P = 2p^2 = \frac{1}{n}$$
(2)

即

$$p = \sqrt{\frac{1}{2n}}$$

令正态分布中相应于概率为 p 的分位值为 $k_{\alpha L2}$, 则相邻 2 测点的临界值 x_{L2} 为

$$x_{L2} = \bar{x} - k_{\alpha L2} S$$
(3)

式中: x_{L2} ——缺陷相邻测点临界值; $k_{\alpha L2}$ ——概率为 $\sqrt{\frac{1}{2n}}$ 的分位值.

2 试验设计

制作一批 150 mm × 150 mm × 150 mm 按规范要求的混凝土标准试块, 混凝土强度等级为 C30, 粗骨料(石子)粒径为 5 ~ 31.5 mm, 细骨料为中粗砂, 水泥为 42.5 级硅酸盐水泥, 在湿度为 85 % 以上、平均温度 20 ℃ 的条件下养护 28 d. 采用北京智博联科技有限公司生产的 ZBL-U520 型非金属超声检测仪检测试块的超声波波速, 对每块试块的 2 个侧面(A 面和 B 面)进行对测.

表 1 为标准试块超声波波速检测结果, 经检测同一块试块不同侧面的波速, 发现大部分试块的波速都有所波动. 从表 1 可看出, 在 10 组共 30 块试块中, 波速误差率最高达 5.42 % , 最低为零.

表 1 标准试块波速值

Table 1 Wave speed of standard segment

编号	波速/(km·s ⁻¹)				误差率/%	编号	波速/(km·s ⁻¹)				误差率/%
	A 面	B 面	平均值	A 面与 B 面绝对差			A 面	B 面	平均值	A 面与 B 面绝对差	
1	5.017	5.051	5.034	0.034	0.675	16	4.950	5.085	5.018	0.135	2.691
2	5.017	4.823	4.920	0.194	3.943	17	5.085	5.017	5.051	0.068	1.346
3	5.155	5.155	5.155	0.000	0.000	18	5.017	5.226	5.122	0.209	4.081
4	5.085	5.085	5.085	0.000	0.000	19	4.823	4.950	4.887	0.127	2.599
5	5.017	4.823	4.920	0.194	3.943	20	4.762	4.886	4.824	0.124	2.570
6	4.950	5.226	5.088	0.276	5.425	21	4.762	4.950	4.856	0.188	3.871
7	4.950	5.017	4.984	0.067	1.344	22	5.155	5.017	5.086	0.138	2.713
8	4.950	5.017	4.984	0.067	1.344	23	4.702	4.762	4.732	0.06	1.268
9	5.226	5.085	5.156	0.141	2.735	24	4.950	5.017	4.984	0.067	1.344
10	5.155	5.155	5.155	0.000	0.000	25	4.823	4.823	4.823	0.000	0.000
11	4.950	4.950	4.950	0.000	0.000	26	4.886	4.886	4.886	0.000	0.000
12	4.886	4.886	4.886	0.000	0.000	27	5.017	5.017	5.017	0.000	0.000
13	4.886	5.017	4.952	0.131	2.646	28	4.950	4.886	4.918	0.064	1.301
14	4.823	4.886	4.855	0.063	1.298	29	5.085	5.017	5.051	0.068	1.346
15	4.823	5.017	4.920	0.194	3.943	30	5.085	4.95	5.018 0	0.135	2.691

3 正态分布检验

3.1 原始数据的 χ^2 检验

χ^2 分布^[9-10]可用来对正态分布和原始资料进行检验. 根据一个正态分布总体的性质, 假定总体样本的平均值为 μ , 标准差为 σ ; 从该总体中取 n 个样本, 样本内每个观测值可以根据式(4)进行标准化处理:

$$z = \frac{x_i - \mu}{\sigma}$$
(4)

假定总体为一标准分布, 希望应用统计检验来判断总体中获取的样本能否真实反映总体的分布. 这种检验统计可以将一个标准正态分布分成若干的区块, 从标准正态分布选取的随机观测值落在任一区块的概率等于曲线下面区块的面积. 在每一区块, 期望的观测数是可以计算的, 出现的期望频率可以和落在该区块的简单观测频率相比较. 这一检验统计可用式(5)计算:

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(O_j - E_j)^2}{E_j}$$
(5)

式中： O_j ——第 i 级内的观测数； E_j ——第 i 级内的期望观测数； j ——级或区间。

通常人们将一个标准正态分布分成 4 个区块，如果每个区块包含的面积相同，即出现的概率相等，那么等面积的界限为： $-\infty \sim -0.67$ ； $-0.67 \sim 0.00$ ； $0.00 \sim 0.67$ ； $0.67 \sim +\infty$ 。当原始资料被标准化处理后，期望标准化后的 1/4 的值大致平均落在上述每个区块，如果这样，就能判断总体中获取的样本是否真实反映总体的分布。

上述试验得到的 60 个变量值标准化处理后的顺序排列见表 2。

表 2 原始数据的 χ^2 检验计算
Table 2 Computation of the original data using the χ^2 check method

样本分布 排序	$-\infty \sim -0.67$	$-0.67 \sim 0.00$	$0.00 \sim 0.67$	$0.67 \sim +\infty$	样本分布 排序	$-\infty \sim -0.67$	$-0.67 \sim 0.00$	$0.00 \sim 0.67$	$0.67 \sim +\infty$
1	-2.2166	-0.733 9	0.321 8	0.869 8	11	-1.241 6	-0.218 1	0.321 8	1.433 9
2	-1.733 1	-0.733 9	0.321 8	0.869 8	12		-0.218 1	0.321 8	1.433 9
3	-1.733 1	-0.733 9	0.321 8	0.869 8	13		-0.218 1	0.321 8	2.006 0
4	-1.733 1	-0.733 9	0.321 8	0.869 8	14		-0.218 1	0.321 8	2.006 0
5	-1.241 6	-0.733 9	0.321 8	0.869 8	15		-0.218 1	0.595 8	2.006 0
6	-1.241 6	-0.733 9	0.321 8	0.869 8	16		-0.218 1		
7	-1.241 6	-0.733 9	0.321 8	0.869 8	17		-0.218 1		
8	-1.241 6	-0.733 9	0.321 8	1.433 9	18		-0.218 1		
9	-1.241 6	-0.218 1	0.321 8	1.433 9	19		-0.218 1		
10	-1.241 6	-0.218 1	0.321 8	1.433 9					

根据公式(5)， χ^2 的计算值为 2.133，小于 χ^2 的临界值 3.81(自由度为 1，置信水平为 0.05)。因此，可以得到结论：没有依据证明所测量的声波值不服从正态分布。

3.2 正态分布检验

判定某组数据样本是否符合正态分布的检验方法有多种，本文采用 χ^2 检验法进行检验。假设 H_0 ： X 的概率密度为 $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$ ($-\infty < x < +\infty$)，由最大似然估计法得 μ 、 σ^2 的估计值分别为 $\hat{\mu} = 4.977$ km/s， $\hat{\sigma}^2 = 0.109^2$ 。在 H_0 范围内将 X 可能取值的区间($-\infty, +\infty$)分为 10 个小区间，取事件 A_i 如表 2 中第 1 列所示。若 H_0 为真， X 的概率密度的估计为

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 0.109} e^{-\frac{(x-4.977)^2}{2 \times 0.109^2}} \quad (-\infty < x < +\infty) \tag{6}$$

按式(6)并查标准正态分布函数表得概率 $P(A_i)$ 的估计值，计算结果如表 3 所示。

由表 3 可知：自由度为 7，置信水平为 0.05，所以 χ^2 的临界值为 14.07，大于计算值 4.92，故在显著性水平 0.05 下接受 H_0 ，即认为表 3 的数据是来自正态分布总体。因此认为表 3 中的检测数据是可靠的，是具有代表性的，所以当混凝土内无缺陷时，超声波波速的传递特点服从正态分布。

综上所述，从原始数据的 χ^2 检验及应用概率法检验的结果均揭示了超声波波速的分布特点服从正态分布，说明了该批混凝土的质量是可靠的，无缺陷，无需更多的试验即可确定该材料的特征指标。

4 结 语

研究声学参数在混凝土的传播规律，对采用声波透射法检测基桩混凝土质量意义重大，只有充分了解了其传播规律、特点，才能够根据检测到的声学参数来分析基桩的质量状况。本文通过混凝土试块的试验揭示了超声波在无缺陷混凝土中的传播规律，应用原始数据的 χ^2 检验，验证了超声波在无缺陷混凝土中的传播

表 3 概率法的 χ^2 检验计算
Table 3 Computation of probability using the χ^2 check method

A_i	χ^2	f_i	$\hat{p}_i$	$\hat{np}_i$	$\frac{f_i^2}{\hat{np}_i}$
A_1	$x \leq 4.774$	1	0.0314	0.942	1.062
A_2	$4.774 < x \leq 4.817$	0	0.0394	1.182	0.000
A_3	$4.817 < x \leq 4.859$	4	0.0693	2.079	7.696
A_4	$4.859 < x \leq 4.902$	3	0.1050	3.150	2.857
A_5	$4.902 < x \leq 4.944$	4	0.1370	4.110	3.893
A_6	$4.944 < x \leq 4.986$	5	0.1538	4.614	5.418
A_7	$4.986 < x \leq 5.029$	3	0.1485	4.455	2.020
A_8	$5.029 < x \leq 5.071$	3	0.1207	3.621	2.486
A_9	$5.071 < x \leq 5.114$	3	0.0893	2.679	3.359
A_{10}	$5.114 < x \leq +\infty$	4	0.1056	3.168	5.051
合 计		30	1	30.000	25.080

注： f_i 为统计频数。

特征服从正态分布.

参考文献:

[1] 吴慧敏,吴新璇.建设工程无损检测技术在我国的发展[J].质量检测,1999(5):22-23.
[2] TB 10218—99,铁路工程基桩无损检测规程[S].
[3] 罗骥先.桩基工程检测手册[M].北京:人民交通出版社,2003:1-7;182-254.
[4] GB 50007—2002,建筑地基基础设计规范[S].
[5] 刘其伟,程跃辉,王健,等.超声波无损检测的特点分析及其在混凝土缺陷判定中的应用[J].华东公路,2003(4):58-60.
[6] JGJ 106—2003,建筑基桩检测技术规范[S].
[7] CECS 21:2000,超声波检测混凝土缺陷技术规程[S].
[8] 胡健颖,冯泰.实用统计学[M].北京:北京大学出版社,1996.
[9] GEORGE S, KOGH J R, RICHARD F. Link statistical analysis of geological data[M]. New York: Dover Publications, 1971.
[10] MORINEAN A. Aide-mémoire statistique[R]. Paris: Cisia Ceresta, 1995.

Tests on the features of ultrasonic wave speed in concrete

ZHANG Yong-le^{1,2}, YANG Jian-chao³, TANG De-gao¹

- (1. College of Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China;
2. Jiangsu Province Jianyuan Geologic Engineering & Investigation Co., Ltd, Nanjing 210029, China;
3. Luoyang Hydraulic Engineering Research Institute, Luoyang 471023, China)

Abstract: A number of precast concrete segments were checked with an ultrasonic detector. The normal distribution of the original data was checked using the χ^2 check method, and its consistency was proved. The results indicate that the propagation rule of an ultrasonic wave in concrete without defects fits the normal distribution: the mathematical average value in the tests can be used as an overall mathematical expectation for all the samples, thus reducing the number of tests needed and disclosing the propagation rule for an ultrasonic wave in concrete.

Key words: ultrasonic wave; concrete segments; the χ^2 check method; probability method; normal distribution

· 简讯 ·

第 12 届水利量测技术综合学术研讨会将在南京召开

中国水利学会水利量测技术专业委员会定于 2008 年 11 月在南京市河海大学召开第 12 届水利量测技术综合学术研讨会.会议主题包括 (a)新型传感器 (b)堤坝隐患探测技术及仪器 (c)洪水险情快速探测技术及仪器 (d)水利水电工程安全监测仪器及系统 (e)水利水电工程施工质量检测、控制技术及仪器 (f)室内试验及原型观测新技术及仪器设备 (g)量水技术及仪器 (h)水文要素(水位、流速、流量、断面、含沙量、颗分及冰凌等)观测及系统自动化技术 (i)水质监测新仪器及系统自动化技术 (j)冰测量技术与仪器;(k)水利水电量测技术新进展介绍与评述 (l)水信息采集和处理有关技术 (m)其他有关技术.

会议还就相关主题征集论文.详细情况可关注河海大学网站: <http://www.hhu.edu.cn>.
(本刊编辑部供稿)