

文章编号:1673-2049(2012)02-0102-09

基于超声对测法的钢管混凝土脱空检测试验

檀永杰¹, 徐 波², 吴智敏¹, 何化南¹

(1. 大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 大连市建设工程质量监督站, 辽宁 大连 116012)

摘要:分析了超声波对测法在钢管混凝土脱空区 4 种可能的超声首波传播路径,并给出了 4 种传播路径的声时理论计算公式。通过试验得到了实际传播声时,并与由声时公式计算的理论值对比,得到了在 2 种脱空区范围内超声首波的传播路径,即沿绕射脱空缺陷传播,为超声对测法定量检测脱空区范围提供了条件;通过 MATLAB 的内插函数,将对测法得到的测区内各离散测点超声首波声时矩阵进行处理,得到整个测区的钢管混凝土脱空信息,基于此绘出脱空区声时分布色谱图,以达到定量检测的效果。最后给出了超声对测法适用的脱空缺陷对应的圆心角范围。结果表明:基于超声对测法的声时分布色谱图达到定量检测缺陷的目的,且满足工程精度要求。

关键词:钢管混凝土;脱空区;定量检测;超声对测法;首波路径;色谱图

中图分类号:TU317 **文献标志码:**A

Experiment on Void Area Testing of Concrete-filled Steel Tube Based on Ultrasonic Testing Method

TAN Yong-jie¹, XU Bo², WU Zhi-min¹, HE Hua-nan¹

(1. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;

2. Dalian Construction Engineering Quality Supervision Station, Dalian 116012, Liaoning, China)

Abstract: Four possible propagation paths in the disengaging by ultrasonic testing method for void area of concrete-filled steel tube were analyzed, and the theoretical calculation formulae of ultrasonic travel time for four propagation paths were given. From the comparisons between the experimental values and the theoretical values, the real propagation paths in the two kinds of disengaging were obtained, which provided the conditions for the quantitative test of the disengaging. With the interpolation function from MATLAB, matrix of ultrasonic travel time of the disengaging would be disposed, and the disengaging of the concrete-filled steel tube was got. Then the chromatogram of ultrasonic travel time distribution was drawn and it could be used for quantitative analysis. Finally, the applicable range of the central angle with the ultrasonic testing method was proposed. Results show that the chromatogram of ultrasonic travel time distribution based on ultrasonic testing method can reach the purposes of quantitative detection defects and can meet accuracy requirements of the project.

Key words: concrete-filled steel tube; void area; quantitative testing; ultrasonic testing method; propagation path; chromatogram

0 引言

超声波检测混凝土质量的技术已经较为成熟,

并在各国得到了广泛应用^[1-4]。中国《超声波检测混凝土缺陷技术规程》(CECS 21—2000,以下简称规程)^[5]给出了超声波检测混凝土质量、灌注桩质量和

钢管混凝土缺陷的方法,规范了超声波技术在工程中的应用。在定量检测混凝土内部质量方面,超声波层析成像的研究比较深入,如在超声波层析成像的算法研究,反演成像,后期数据处理,检测系统开发等方面作了较多有益的研究,并成功应用于工程中^[6-15]。对于钢管混凝土,虽然规程给出了胶结良好区内部空洞的检测方法,但对于脱空缺陷的检测并没有提及,而脱空缺陷在钢管混凝土中又是极为常见的。由于钢管混凝土的特殊性:钢管壁会影响超声波首波传播路径^[16],使超声法定量检测钢管混凝土脱空缺陷技术的发展受到一定的制约。目前,钢管混凝土超声波检测主要的研究领域包括^[17-26]:超声首波的传播路径确定,声时、波幅、频率、波形等多参数综合判据的研究,定量检测脱空量的研究,对测法、斜测法、扇形扫测等检测方法的研究,钢管壁屏蔽区对超声成像影响的研究等。如何通过最简单的检测方法,以最少的参数,得到满足工程要求精度的检测结果,甚至实现定量检测缺陷大小和钢管混凝土内部质量的超声层析成像,仍然在不断探索之中。

本文中笔者在已有的研究成果上,以超声对测法为基础,分析了 4 种可能的超声首波传播路径,计算其理论传播声时,得到了不同种类脱空的理论首波声时;再通过模型试验,测得了预置脱空区的首波声时。对比理论值与试验值的规律特点,研究确定了超声首波的实际传播路径,为对测法定量检测脱空范围提供了条件。通过 MATLAB 的内插函数,将对测法得到的测区内各离散测点超声首波声时矩阵进行处理,得到整个测区的钢管混凝土脱空信息,基于此绘出脱空区声时分布色谱图,达到定量检测脱空缺陷的目的。

1 首波路径分析

钢管混凝土脱空缺陷分为 2 类:一类是收缩脱空,由于混凝土收缩导致的沿钢管环向的脱空,特点是脱空高度小,但环向和轴向脱空范围大;一类是近壁空穴,由于填充不密实,混凝土在重力作用下流动造成的局部近壁空穴,特点是脱空高度大,但脱空范围小。根据费马原理,超声波沿射线传播的旅行时和沿其他路径传播的旅行时相比为最小,也就是波沿旅行时最小的路径传播。因此,钢管混凝土存在脱空缺陷时,由于空气中声波速度约为 $340\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,而在钢材和混凝土中的传播速度高达 $4\,000\sim6\,000\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,超声波射线会绕过缺陷区,沿走时最小的路径传播。根据这一原理,工程中常用超声对测法来检测钢管

混凝土脱空区缺陷。

超声对测法是最常用的超声检测方法,而最简单的判读缺陷的参数是首波声时 τ ,即利用首波到达的时间来判断钢管混凝土内部的质量。根据费马原理,当钢管混凝土内部存在缺陷(如脱空或空洞)时声波传播路径会变长,导致首波声时变大,相反密实区路径较短,声时较小。由于钢管壁的影响,其首波传播路径较为复杂,如果想定量测定脱空区大小,必须明确首波传播路径。目前,总结已有研究成果和工程经验,超声对测法首波传播路径有 4 种可能情况,如图 1 所示:路径 1,沿径向透射混凝土;路径 2,绕射脱空区后透射混凝土,即声波由超声波发射换能器发出后经 A' , B' , C' 点到达接收换能器;路径 3,透射脱空区后再透射混凝土;路径 4,沿钢管壁环向传播。

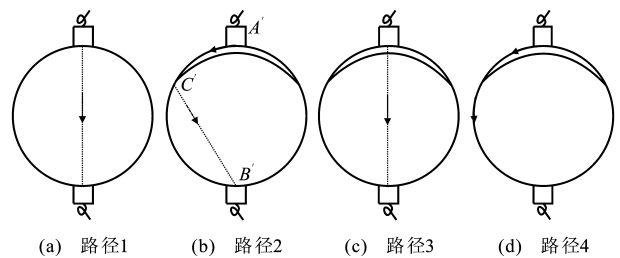


图 1 4 种可能传播路径

Fig. 1 Four Possible Propagation Paths

1.1 密实区首波路径

在钢管混凝土密实区,即混凝土填充密实且与钢管壁粘结良好的区域,首波沿路径 1 传播。在密实区,超声对测法的首波将会沿径向(钢管壁—混凝土—钢管壁)传播,传播路径为一条连接发射换能器和接收换能器的直线。此时,首波声时计算如下

$$\tau_1 = \frac{2t}{v_s} + \frac{D' - 2t}{v_c} \tag{1}$$

式中: τ_1 为首波沿路径 1 传播声时; t 为钢管壁厚; D' 为钢管外径; v_s 为钢管内超声波的速度; v_c 为混凝土内超声波的速度。

1.2 脱空区首波路径

脱空区超声波首波有 2 种可能的传播路径:一是绕射脱空区后透射混凝土,如图 1 中路径 2;一是透射脱空区后再透射混凝土,如图 1 中路径 3。

1.2.1 绕射脱空区后透射混凝土

在脱空区,首波可能沿路径 2 传播,即发射换能器发出的脉冲波到达脱空界面时,超声波会先沿钢管壁绕射再穿透混凝土到达接收换能器(即管壁—绕射—混凝土—管壁)。此时,首波声时计算如下

$$\tau_2 = \frac{2t}{v_s} + \frac{L_{AC}}{v_s} + \frac{L_{CB}}{v_c} \tag{2}$$

式中： τ_2 为首波沿路径 2 传播声时； L_{AC} 为脱空钢管壁 AC 的弧长； L_{CB} 为混凝土内透射距离 CB 的长度。

1.2.2 透射脱空区后再透射混凝土

刘永前等、潘卫育等认为，当使用较高频率的换能器，且脱空厚度较小（小于 10 mm）时，高能超声波虽然在脱空区有一定衰减，但是大部分频率的波可以穿透脱空区，继续沿直线传播，所以在脱空区，接收换能器接到的首波信号还有可能沿路径 3 传播，即声波先透射钢管壁再继续透射脱空区，最后沿径向向穿透混凝土到达接收换能器。此时，首波声时计算如下

$$\tau_3 = \frac{2t}{v_s} + \frac{d}{v_a} + \frac{D' - 2t - d}{v_c} \tag{3}$$

式中： τ_3 为首波沿路径 3 传播声时； d 为脱空区厚度； v_a 为空气中超声波的速度。

1.3 沿钢管壁环向传播路径

当脱空范围较大时，首波沿路径 4 传播，即超声波首波将不会穿透混凝土，而是沿钢管壁环向传播到达接收换能器。此时，首波声时计算如下

$$\tau_4 = \frac{2t + 0.5\pi(D' - 2t)}{v_s} \tag{4}$$

式中： τ_4 为首波沿路径 4 传播声时。

2 试验研究

2.1 试验模型

在实验室制备了 6 根钢管混凝土圆柱。柱高 500 mm，外径 219 mm，壁厚 $t=5.3$ mm，钢管型号 Q235，内部填充 C50 混凝土。其中，NT1, NT2, NT3 号柱预置收缩脱空模板，脱空模板厚度分别为 $d_1=3.0$ mm, $d_2=4.5$ mm, $d_3=7.0$ mm，模板形状及尺寸如图 2(a)所示。在浇注混凝土之前，将脱空模板固定在钢管壁上，并保证贴合紧密，待混凝土初凝后拔出模板，即得到不同厚度、不同弧长的收缩脱空缺陷，在高度方向（轴向）脱空区范围呈阶梯形分布，如图 2(b)所示，在截面环向收缩脱空范围如图 3 所示。NT4, NT5, NT6 号柱预置近壁空穴模板，用不同宽度和高度的矩形木板固定在钢管内部，将浇注的混凝土挡住，待混凝土初凝后拔出模板，即在木板与钢管壁之间形成近壁空穴区，木板形状及尺寸如图 4(a)所示，在高度方向（轴向）脱空区范围如图 4(b)所示，在截面环向脱空范围如图 5 所示。

2.2 测点布置

如图 6(a)所示，沿钢管混凝土柱高度方向的测

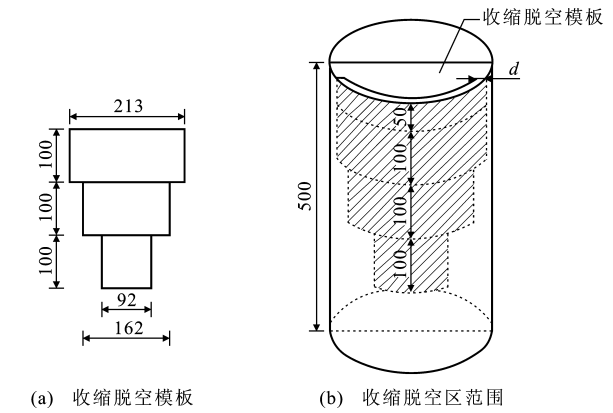


图 2 收缩脱空模板和脱空区沿高度方向范围 (单位:mm)
Fig. 2 Shrinkage Void Formwork and Void Area in Height Direction (Unit:mm)

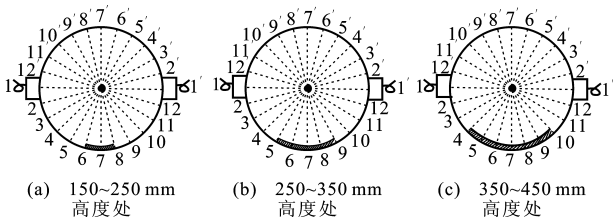


图 3 收缩脱空截面环向范围
Fig. 3 Shrinkage Void Areas in Section

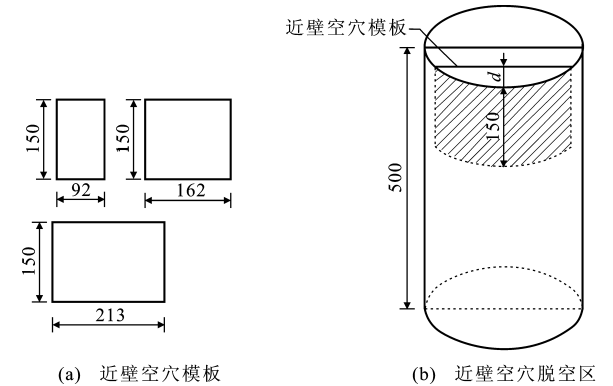


图 4 近壁空穴模板和脱空区沿高度方向范围 (单位:mm)
Fig. 4 Near Wall Cavity Formworks and Void Area in Height Direction (Unit:mm)

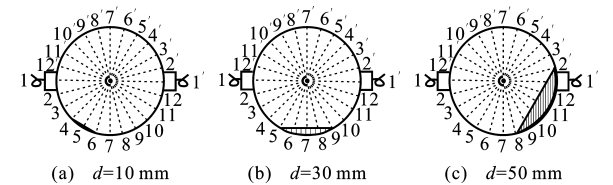


图 5 近壁空穴脱空截面环向范围
Fig. 5 Near Wall Cavity Void Areas in Section

点 A, B, C, D, E, F, G, H 布置在距柱底端 50~450 mm 范围内，测点间距 50 mm；如图 6(b)所示，在同一高度沿环向均匀布置 12 个测点，每隔 15°布

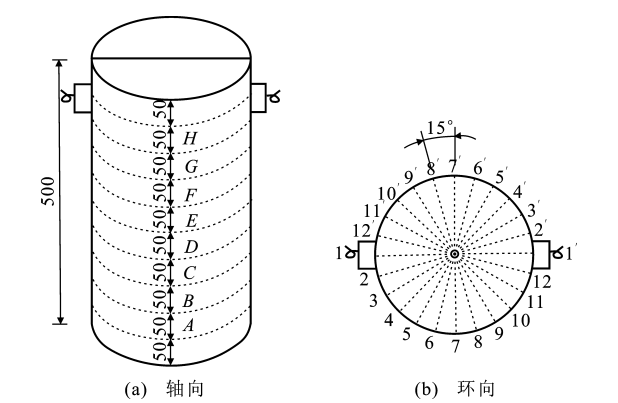


图 6 测点布置(单位:mm)

Fig. 6 Arrangements of Measuring Points (Unit:mm)
置 1 个测点,每根柱可得到 96 个测点数据。测点与脱空对应关系见图 6。

2.3 试验过程

该试验所用仪器为 Proceq 公司的 TICO 混凝土超声波探测仪,可得到首波声时。在不同龄期(2, 4,7,15,28,60 d)测试了 6 根钢管混凝土柱,每个测点测试 3 组数据,取平均值作为该点首波声时。

3 理论与试验对比分析

本文中以 60 d 数据作为分析对象。虽然混凝土声速随龄期增加呈增长趋势,但从该试验的同步测强曲线可以看出,混凝土声速变化不大,因此 60 d 龄期具有一定的代表性。考虑到混凝土是非匀质材料,在试验中观测到的混凝土声速有一定离散性,于是同步制备了100 mm×100 mm×100 mm的混凝土

土立方体试块,测得了 60 d 龄期混凝土试块的超声波速度,其中 60 d 龄期平均声速试验值见表 1。

表 1 60 d 龄期混凝土平均声速
Tab.1 Average Sound Velocities of Concrete in Age of 60 d

试件编号	强度/MPa	距离/mm	平均声时/ μ s	声速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	平均声速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	72.6	100.0	20.4	4 894	4 880
2	71.6	102.5	21.0	4 886	
3	72.6	100.0	20.6	4 860	

注:取平均声速作为计算理论传播路径声时的混凝土声速。

3.1 密实区路径分析

每根柱子都有一段密实区,取部分密实良好的测区声时进行试验,结果见表 2。

钢管壁厚 $t=5.3\text{ mm}$,钢管外径 $D'=219\text{ mm}$,钢管声速 $v_s=5\,620\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,由式(1)计算得到,密实区首波沿路径 1 传播的理论首波声时 $\tau_1=44.6\text{ }\mu\text{s}$ 。表 2 中数据介于 $43.7\sim48.6\text{ }\mu\text{s}$,均值为 $46.2\text{ }\mu\text{s}$,考虑测量误差以及混凝土不均匀性,试验声时与理论声时吻合,可以肯定,在密实区混凝土的传播路径与理论假设一致,即首波沿路径 1 传播。

3.2 收缩脱空区路径分析

表 3 为收缩脱空模型 NT1 和 NT3 脱空区声时试验值。根据第 2.1 节中收缩脱空布置(图 2,3),对比表 3 中异常数据,可以看出,异常声时区域与预置的收缩脱空区范围基本吻合。脱空模板是阶梯形的,而异常声时分布区也符合这一实际情况,说明测试结果可信。

如果收缩脱空区的首波是沿路径 3 传播,则根

表 2 密实区声时试验值

Tab.2 Experimental Values of Ultrasonic Travel Time in Closely Packed Areas

测点编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
NT3-B	45.7	45.1	45.1	45.5	46.8	45.8	46.2	46.5	46.1	46.4	46.4	46.0
NT4-A	46.2	46.4	47.6	47.6	47.8	48.6	47.7	46.1	45.9	46.1	46.1	46.0
NT5-F	47.2	48.2	47.7	46.5	46.1	46.6	47.8	47.4	46.9	45.0	44.9	45.5
NT6-C	45.7	45.8	46.0	46.1	45.2	44.6	44.8	45.4	45.4	45.0	45.6	45.9

据式(3),计算得首波声时如表 4 所示。式(3)中声时只与脱空厚度有关,因此 NT1 和 NT3 脱空区声时值,应该全部等于或接近表 4 中的声时理论值,但这与表 3 试验结果不符。因此假设首波沿路径 3 传播,是不成立的。

如果收缩脱空区的首波是沿路径 2 传播,则根据式(1)和式(2),计算得 NT1~NT3 脱空区声时理论值如表 5 所示。由于路径 2 声时与脱空厚度无关,所以 NT1,NT2,NT3 的声时理论值均相同,异常声时区域与图 2,3 所示收缩脱空范围吻合。

从表 5 声时理论值可以看出收缩脱空区沿路径 2 传播的声时变化特点:在脱空的弧顶处(第 7 列数据),声时理论值最大,随着测点向脱空边界环向偏移,声时值逐渐减小。由试验得到的表 3 中的声时试验值也呈现出相同的规律,如 NT1-F,NT1-G,NT1-H 声时数据,NT3-E,NT3-F,NT3-G 声时数据,变化规律均符合路径 2 的特点。综上所述可以肯定,收缩脱空区首波应沿路径 2 传播。此时的脱空厚度为 3~7 mm,并没有发生透射脱空区的现象,说明 54 kHz 的超声波不能穿透厚度在 3 mm 以

表 3 NT1,NT3 收缩脱空区声时试验值

Tab.3 Experimental Values of NT1,NT3 Ultrasonic Travel Time in Shrinkage Void Areas

测点编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
NT1-C	54.8	53.9	49.6	45.1	45.1	47.5	47.8	48.0	46.0	45.4	46.2	63.7
NT1-D	54.3	54.6	56.9	45.5	46.0	62.8*	60.0*	67.9*	46.8	45.8	45.8	60.2
NT1-E	50.5	51.6	50.8	47.1	46.9	63.4*	60.8*	67.8*	47.6	45.8	45.8	49.0
NT1-F	47.2	48.9	47.9	46.8	50.5*	58.6*	59.5*	59.8*	52.0*	46.3	45.4	45.4
NT1-G	44.6	45.6	46.6	54.1*	56.5*	59.7*	60.3*	58.6*	57.6*	57.8*	46.7	45.1
NT1-H	44.3	44.7	45.0	54.3*	57.5*	59.7*	60.0*	59.8*	57.4*	54.1*	45.9	45.1
NT3-C	46.0	45.5	45.4	45.5	46.1	48.6	48.7	47.7	46.2	45.5	46.2	46.0
NT3-D	45.2	45.8	45.3	46.0	46.8	64.4*	58.8*	59.7*	48.2	46.3	46.1	45.8
NT3-E	46.3	46.6	45.8	47.8	51.3*	60.3*	60.4*	65.5*	48.2	47.7	45.9	45.7
NT3-F	44.8	44.8	45.2	50.0*	58.1*	59.8*	61.1*	61.3*	56.2*	50.4*	46.1	45.3
NT3-G	45.9	46.0	48.4	53.4*	61.1*	61.6*	62.3*	61.3*	58.0*	53.8*	47.8	46.2
NT3-H	46.4	47.7	60.5*	55.8*	60.9*	61.4*	61.8*	61.3*	60.8*	57.2*	48.9	45.7

注：* 表示数据为异常声时值，下同。

表 4 收缩脱空区沿路径 3 传播的声时理论值

Tab.4 Theoretical Values of Ultrasonic Travel Time Along Path 3 in Shrinkage Void Areas

试件编号	NT1	NT2	NT3
τ_3	52.8	56.9	63.7

上的脱空区。

值得注意的是,表 3 中的脱空弧顶处(第 7 列数据)的最大声时试验值大于最大声时理论值,接近沿管壁环向传播的声时($\tau_4=61.2\mu\text{s}$),但并未达到路径 3 的声时理论值 τ_3 ,这是因为弧顶处超声首波受到脱空边界复杂区的影响,导致声时变大。观察表 3 中脱空边界区的数据,有异常偏大的现象,如 NT1-D 的第 6、7 列数据,这说明在某些脱空边界

处,确实存在导致声时变大的因素。通过观察试件脱空区内部,发现这些边界复杂区往往有混凝土粘在钢管壁上或填充有疏松的混凝土,使声波路径变得复杂不定,声时变大。但是这并不影响对脱空范围的定量判断,反而使脱空边界在数据上体现的更加明显,这一点在第 4 节中的声时分布色谱图中可以得到验证。

3.3 近壁空穴区路径分析

NT4~NT6 三根钢管混凝土柱,内部预置了近壁空穴缺陷。由试验得到的近壁空穴脱空区首波声时试验值见表 6。由异常声时的分布范围可以很明显地观察出近壁空穴的范围,异常声时值分布范围与图 4 和图 5 所示近壁空穴范围吻合,说明测试结

表 5 NT1~NT3 收缩脱空区沿路径 2 传播的声时理论值

Tab.5 Theoretical Values of NT1-NT3 Ultrasonic Travel Time Along Path 2 in Shrinkage Void Areas

测点编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
C	44.6	44.6	44.6	44.6	44.6	47.8*	51.7*	47.8*	44.6	44.6	44.6	44.6
D	44.6	44.6	44.6	44.6	44.6	47.8*	51.7*	47.8*	44.6	44.6	44.6	44.6
E	44.6	44.6	44.6	44.6	49.0*	52.8*	55.8*	52.8*	49.0*	44.6	44.6	44.6
F	44.6	44.6	44.6	44.6	49.0*	52.8*	55.8*	52.8*	49.0*	44.6	44.6	44.6
G	44.6	44.6	44.6	48.7*	52.5*	55.7*	58.1*	55.7*	52.5*	48.7*	44.6	44.6
H	44.6	44.6	44.6	48.7*	52.5*	55.7*	58.1*	55.7*	52.5*	48.7*	44.6	44.6

表 6 NT4~NT6 近壁空穴脱空区声时试验值

Tab.6 Experimental Values of NT4-NT6 Ultrasonic Travel Time in Near Wall Cavity Void Areas

测点编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
NT4-H	46.0	46.3	46.7	50.9*	53.8*	51.5*	47.5	45.7	46.3	45.9	46.0	46.1
NT4-G	46.3	46.4	47.9	51.4*	55.6*	53.6*	47.0	46.2	46.1	45.6	45.8	45.7
NT5-H	47.0	47.7	47.4	46.1	52.8*	56.5*	58.3*	57.0*	68.9*	47.2	45.2	45.0
NT5-G	44.9	45.6	45.8	45.8	56.2*	57.3*	58.7*	56.5*	67.9*	46.7	44.9	44.5
NT6-H	54.8*	56.0*	46.0	45.9	45.6	45.5	48.0*	53.7*	57.8*	58.7*	61.2*	58.9*
NT6-G	55.0*	52.3*	46.6	46.5	46.4	46.7	50.8*	55.9*	57.6*	60.1*	61.0*	60.9*

果可信。

如果近壁空穴脱空区的首波是沿路径 3 传播,则根据式(3)计算得近壁空穴弧顶最大声时理论值如表 7 所示。表 6 中最大声时试验值没有达到表 7 中的最大值,且相差很大。因此假设近壁空穴脱空区首波沿路径 3 传播是不成立的。

表 7 近壁空穴区沿路径 3 传播的最大声时理论值

Tab. 7 Theoretical Values of Maximum Ultrasonic Travel Time Along Path 3 in Near Wall Cavity Areas μs

试件编号	NT4	NT5	NT6
τ_3	72.0	126.7	181.4

表 8 NT4~NT6 近壁空穴脱空区声时理论值

Tab. 8 Theoretical Values of NT4-NT6 Ultrasonic Travel Time in Near Wall Cavity Void Areas μs

测点编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
NT4-H	44.6	44.6	44.6	47.8*	51.7*	47.8*	44.6	44.6	44.6	44.6	44.6	44.6
NT4-G	44.6	44.6	44.6	47.8*	51.7*	47.8*	44.6	44.6	44.6	44.6	44.6	44.6
NT5-H	44.6	44.6	44.6	44.6	49.0*	52.8*	55.8*	52.8*	49.0*	44.6	44.6	44.6
NT5-G	44.6	44.6	44.6	44.6	49.0*	52.8*	55.8*	52.8*	49.0*	44.6	44.6	44.6
NT6-H	52.5*	48.7*	44.6	44.6	44.6	44.6	44.6	48.7*	52.5*	55.7*	58.1*	55.7*
NT6-G	52.5*	48.7*	44.6	44.6	44.6	44.6	44.6	48.7*	52.5*	55.7*	58.1*	55.7*

G7,NT6-H11,NT6-G11 为近壁空穴的弧顶处数据,弧顶处的数据最大,随着测点向脱空边界环向偏移,声时值逐渐减小。综上所述,与收缩脱空一样,近壁空穴的首波也是沿路径 2 进行传播。同样,在 NT5-H9,NT5-G9 测点的数据也异常偏大,观察试件,这 2 个测点也位于脱空边界处,这再次验证了脱空边界复杂区的存在。

4 声时分布色谱图

4.1 数据处理

表 3 和表 6 是由试验得到的各离散测点的首波声时值,根据声时值的异常,可以从这些离散的测点中找到脱空边界,但由离散测点得到的脱空边界有以下 5 点不足:

- (1)脱空边界线过于粗糙,无法精确定位脱空区边界位置和确定脱空范围。
- (2)数据判读不方便,数据需要逐个对比,工程中容易出现漏判、误判。
- (3)结果表达不直观。

为解决上述不足,本文中将由对测法得到的首波声时值进行后期数据处理,用声时色谱图反映脱空区首波声时的异常变化,使脱空区的判读更加准确、高效和直观。具体步骤如下:

- (1)根据测点数据划分网格,测点即为网格节

如果近壁空穴脱空区的首波是沿路径 2 传播,则根据式(1)和式(2),计算得近壁空穴脱空区声时理论值如表 8 所示。可以看出,理论计算的声时异常区(表 8 中带 * 数据所在区)与图 4,5 所示近壁空穴脱空区吻合度非常高,也呈矩形分布。

从表 8 可以看出近壁空穴脱空区沿路径 2 传播的首波声时理论值的变化特点:在脱空的弧顶处(NT4-H5,NT4-G5,NT5-H7,NT5-G7,NT6-H11,NT6-G11)最大,随着测点向脱空边界偏移,声时值逐渐减小。由试验得到的表 6 中的声时值也具有路径 2 的声时特点:NT4-H5,NT4-G5,NT5-H7,NT5-

点。超声对测法得到的是离散测点声时值,以本文试验为例,得到 8×12 个测点的声时值,划分网格就是将钢管混凝土圆柱的半个圆柱面均匀划分为 8×12 个网格,沿轴向平均划分为 8 个格,沿环向平均划分为 12 个格。

(2)形成初步声时矩阵。将每个网格节点赋予对应的声时值,形成声时矩阵,矩阵中的元素即为对应网格节点的声时值。

(3)加密网格。为了使色谱图能更加精确地反映脱空范围,并且使脱空区边界更加光滑,需要加密网格。本文试验中,将已经划分好的各个网格再均匀划分为 50×50 个网格,相当于将半个圆柱面均匀划分为 400×600 个网格。

(4)形成加密声时矩阵。为获得加密网格后新生成的网格节点的声时值,引入 MATLAB 提供的“V4”差值算法,通过此差值算法,根据已知节点的声时值计算出新增节点的声时值,最后得到一个对应 400×600 个网格节点的加密声时矩阵。

(5)绘制声时分布色谱图,定量判读缺陷范围。根据加密声时矩阵绘出声时分布色谱图,可以形象直观地判读 2 种脱空缺陷所在,并定量得到脱空区范围。

以上方法可以总结为声时分布色谱图法。根据该方法,结合本文中的试验数据绘出的声时分布色

谱图如图 7 所示,图 7 中可以明显地看出缺陷区域。将色谱图得到的脱空范围与第 2 节中的脱空缺陷分布(图 2~5)对比:图 7 中,NT1~NT3 的收缩脱空区沿高度方向范围为 150~450 mm,NT4~NT6 的近壁空穴脱空区沿高度方向为范围 350~450 mm,

这与图 2 和图 4 所示的高度方向脱空范围吻合;同样对比环向脱空分布,与图 3 和图 5 吻合。因此不论是定量检测收缩脱空,还是近壁空穴,不管是高度方向脱空范围,还是环向脱空范围,声时分布色谱图均有较高的精度。

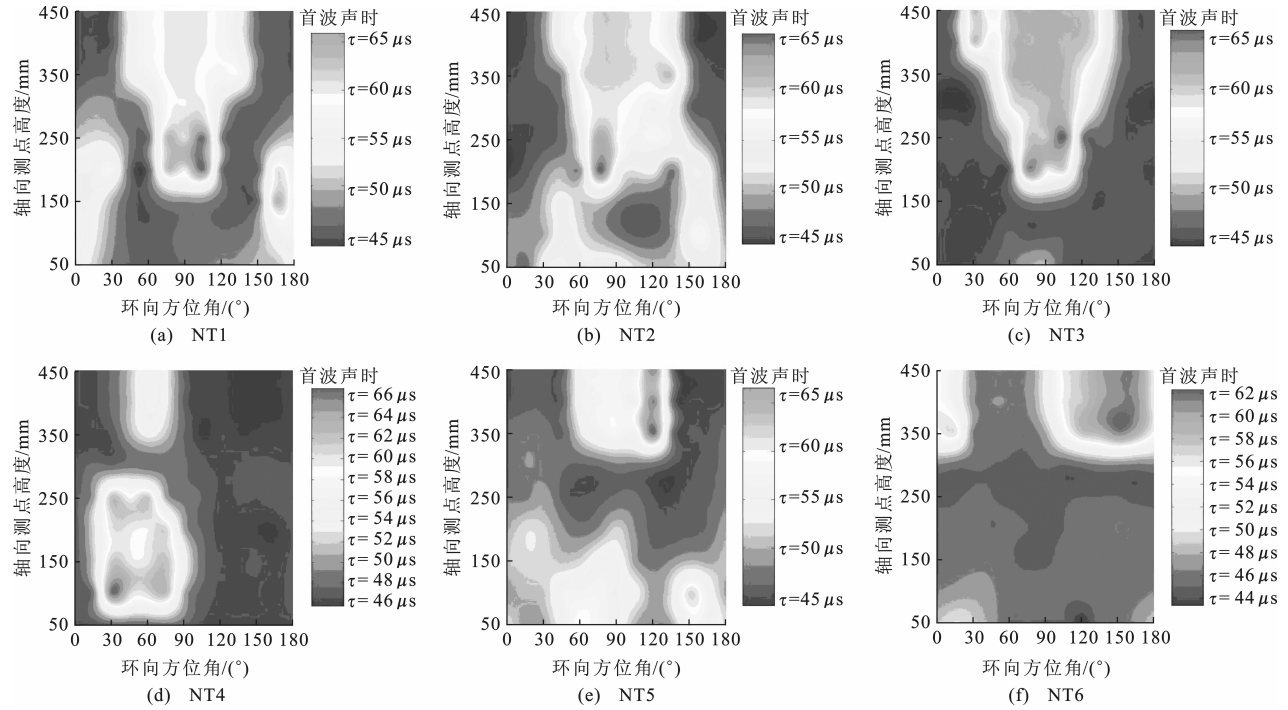


图 7 NT1~NT6 声时色谱图

Fig. 7 NT1-NT6 Chromatograms of Ultrasonic Travel Time

其他区域虽然也有缺陷出现,但不是预置的缺陷,并不在考察范围内。第 3.2 节和第 3.3 节中提出的脱空边界复杂区声时异常偏大的现象,可以在声时分布色谱图中明显体现出来,如 NT3(400~450 mm, 30°附近)和 NT5(350~450 mm, 120°附近)边界处出现缺陷区域,这并没有影响定量检测的精度,反而使脱空边界更加明显。

4.2 声时分布色谱图法的优点

这种通过声时分布色谱图来定量检测脱空区范围的方法,有以下 4 个优点:

- (1)可定量确定脱空区范围,精度较高。
- (2)可直接根据色谱图判读缺陷,相对于规程中给出的用概率统计法判读异常值的方法更加高效。
- (3)可直接使用对测法获得的原始声时数据,避免了大量的几何关系计算,并且测点布置简单,使操作难度和工作量均大为降低。
- (4)可直观地判读脱空范围,效率高、易操作,便于工程人员使用。

5 适用范围

当 $\tau_1 < \tau_2 < \tau_1$ 时,可以认为首波路径是沿路径 2 传播,将第 1 节中的计算公式带入不等式中,可以得到沿路径 2 传播时脱空缺陷对应的圆心角范围,即为对测法适用的圆心角范围。考虑到混凝土的不均匀性,设当首波声时差达到 $2 \mu\text{s}$ 时,认为缺陷可以识别。圆心角范围还与混凝土声速有关,不同声速对应的圆心角范围如表 9 所示。工程应用时,应该注意对测法的适用范围,应根据工程实际情况计算出适用的缺陷范围,避免漏判、误判。根据试验数据和相关文献,表 9 中取钢管声速 $v_s = 5\,620 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,混凝土声速范围为 $3\,800 \sim 5\,400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

6 结 语

- (1)超声波对测法结合声时分布色谱图法,采用首波声时这一单一参数,检测钢管混凝土脱空范围的可行性高,可以达到定量检测的水平。
- (2)收缩脱空和近壁空穴的首波,均是沿绕射脱

表 9 超声对测法适用范围

Tab. 9 Applicable Scopes for Ultrasonic Testing Method

$v_s/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_c/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	最小圆心角/(°)	最大圆心角/(°)
5 620	3 800		
	4 000	12	22
	4 200	12	45
	4 400	12	68
	4 600	12	91
	4 800	12	110
	5 000	12	130
	5 200	12	150
	5 400	12	172

空区再透射混凝土到达接收换能器的路径传播,即沿路径 2 传播。这一结论,使对测法获得的声时数据可以很好地反应脱空范围,且脱空边界在数据上反映明显,为定量检测提供了条件。

(3)将钢管混凝土柱的半个柱面按测点均匀划分网格,根据已知离散测点的声时值,采用差值算法,得到网格细化后的节点声时值,再根据新的声时矩阵做出声时分分布色谱图,这一方法可以总结为声时分分布色谱图法。该方法以超声波对测法为基础,仅仅使用原始的首波声时数据,使定量判读脱空缺陷变的直观、易操作,提高了检测效率。

(4)工程应用时,应该注意对测法的适用范围,应根据工程实际情况计算出适用的缺陷范围,避免漏判、误判。

参考文献:

References:

[1] 刘镇清,刘 骁. 超声无损检测的若干新进展[J]. 无损检测,2000,22(9):403-405,428.
LIU Zhen-qing,LIU Xiao. Development of Ultrasonic Nondestructive Testing Techniques[J]. Nondestructive Testing,2000,22(9):403-405,428.

[2] DEL RIO L M,JIMENEZ A,LOPEZ F,et al. Characterization and Hardening of Concrete with Ultrasonic Testing[J]. Ultrasonics,2004,42(1):527-530.

[3] QASRAWI H Y. Concrete Strength by Combined Nondestructive Methods Simply and Reliably Predicted[J]. Cement and Concrete Research,2000,30(5):739-746.

[4] 张治泰,邱 平. 超声波在混凝土质量检测中的应用[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
ZHANG Zhi-tai,QIU Ping. Application of Ultrasonic in Concrete Quality Testing [M]. Beijing: Chemical Industry Press,2006.

[5] CECS 21—2000,超声波检测混凝土缺陷技术规程

[S].
CECS 21—2000, Technical Specification for Inspection of Concrete Defects by Ultrasonic Method[S].

[6] 王 茜,李佳忆,潘永东. 混凝土超声 CT 成像的研究[J]. 声学技术,2008,27(增):164-165.
WANG Qian,LI Jia-yi,PAN Yong-dong. Study on Ultrasound CT Imaging of Concrete [J]. Technical Acoustics,2008,27(S):164-165.

[7] 王振宇,刘国华. 混凝土构件层析成像的试验研究[J]. 土木工程学报,2005,38(6):110-114.
WANG Zhen-yu,LIU Guo-hua. An Experimental Study on Acoustic Travel Time Tomography of Concrete Component[J]. China Civil Engineering Journal, 2005,38(6):110-114.

[8] 樊 瑶. 超声 CT 技术在混凝土无损检测中的应用研究[D]. 西安:长安大学.
FAN Yao. Study on Using of Ultrasonic Computerized Tomography in Concrete Nondestructive Testing [D]. Xi'an:Chang'an University.

[9] 赵明阶,徐 蓉. 超声波 CT 成像技术及其在大型桥梁基桩无损检测中的应用[J]. 重庆交通学院学报, 2001,20(2):73-77,86.
ZHAO Ming-jie,XU Rong. Ultrasonic Tomography Technology and Its Applications in Undamage Test of Bridge Foundation Piles [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University,2001,20(2):73-77,86.

[10] 周黎明,王法刚,肖国强,等. 超声波层析成像技术在三峡工程混凝土质量检测中的应用[J]. 无损检测, 2004,26(10):517-519,522.
ZHOU Li-ming,WANG Fa-gang,XIAO Guo-qiang, et al. The Application of Ultrasonic Computed Tomography to Test the Concrete Quality of TGP[J]. Non-destructive Testing,2004,26(10):517-519,522.

[11] 刘 波,李朝荣. 超声 CT 成像方法及应用[J]. 中国仪器仪表,2007(2):28-31.
LIU Bo,LI Chao-rong. The Methods and Application of Ultrasound Computed Tomography[J]. China Instrumentation,2007(2):28-31.

[12] WOOD J C,RENS K L. Nondestructive Testing of the Lawrence Street Bridge[C]//CROSS B,FINKE J. 2006 Structural Engineering and Public Safety. St Louis:ASCE,2006:1-5.

[13] MIELENTZ F. Phased Arrays for Ultrasonic Investigations in Concrete Components[J]. Journal of Non-destructive Evaluation,2008,27(1):23-33.

[14] WELLS P N T. Current Status and Future Technical Advances of Ultrasonic Imaging[J]. Engineering in Medicine and Biology Magazine,2000,19(5):14-20.

- [15] KEPLER W F, BOND L J, FRANGOPOL D M. Improved Assessment of Mass Concrete Dams Using Acoustic Travel Time Tomography. Part II—Application[J]. Construction and Building Materials, 2000, 14(3):147-156.
- [16] 张 杰, 沈霄云, 刘明贵. 钢管混凝土声波透射检测方法研究[J]. 无损检测, 2007, 29(9):502-505.
ZHANG Jie, SHEN Xiao-yun, LIU Ming-gui. Research on Ultrasonic Testing Method for Concrete Filled Steel Pipe[J]. Nondestructive Testing, 2007, 29(9):502-505.
- [17] 史新伟, 魏建东. 超声波法测定钢管混凝土脱空量[J]. 人民黄河, 2010, 32(3):88-89, 91.
SHI Xin-wei, WEI Jian-dong. The Ultrasonic Method for Concrete-filled Steel Tube Void[J]. Yellow River, 2010, 32(3):88-89, 91.
- [18] 张 宏, 余钱华, 吕毅刚. 超声透射法检测钢管拱桥拱肋混凝土质量应用研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(8):50-53, 92.
ZHANG Hong, YU Qian-hua, LU Yi-gang. Application Study of Quality Testing of the Arch-rib Concrete of Concrete-filled Steel Tube Arch Bridge by Ultrasonic Transmission Method [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(8):50-53, 92.
- [19] 刘永前, 张彦兵, 邹振祝. 超声波检测钢管混凝土拱桥密实度的试验研究[J]. 北方交通大学学报, 2004, 28(4):54-57.
LIU Yong-qian, ZHANG Yan-bing, ZOU Zhen-zhu. Study of Ultrasonic Detection and Evaluation for the Deficiency of Concrete-filled Steel Tube Arch Bridge [J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2004, 28(4):54-57.
- [20] 潘卫育, 赵 玮, 李传勇, 等. 超声波检测钢管混凝土密实性[J]. 中国铁道科学, 2005, 26(3):64-67.
PAN Wei-yu, ZHAO Wei, LI Chuan-yong, et al. Detection on the Density of Steel Tube Concrete by Ultrasonic Wave [J]. China Railway Science, 2005, 26(3):64-67.
- [21] 童寿兴. 钢管混凝土脱粘的超声波检测与验证[J]. 无损检测, 2007, 29(12):731-732.
TONG Shou-xing. Detecting and Verifying the Quality of Concrete-steel Pipe by Ultrasonic Testing [J]. Nondestructive Testing, 2007, 29(12):731-732.
- [22] 梁 鸣, 刘沐宇, 冯仲仁. 钢管混凝土超声波检测与评价试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2001, 23(12):44-46.
LIANG Ming, LIU Mu-yu, FENG Zhong-ren. Study of Ultrasonic Detection and Evaluation for the Deficiency Recognition of Concrete-filled Steel Tube [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2001, 23(12):44-46.
- [23] 张建仁, 吕毅刚, 余钱华, 等. 大跨度钢管混凝土拱桥超声波检测及面向对象数据处理[J]. 长沙交通学院学报, 2004, 20(1):1-5.
ZHANG Jian-ren, LU Yi-gang, YU Qian-hua, et al. Ultrasonic Examination of Long-span Concrete-filled Steel Tube Arch Bridge and Object-oriented Data Processing [J]. Journal of Changsha Communications University, 2004, 20(1):1-5.
- [24] 张大煦, 王春潮, 马伟阳, 等. 超声波检测中小直径钢管混凝土的方法及分析[J]. 工业建筑, 2004, 34(增):935-938.
ZHANG Da-xu, WANG Chun-Chao, MA Wei-yang, et al. The Method and Analysis of Ultrasonic Testing for Medium and Small Diameter Concrete-filled Steel Tube [J]. Industrial Construction, 2004, 34(S):935-938.
- [25] 李利群, 韩晓键. 超声法检测钢管混凝土质量[J]. 南京建筑工程学院学报, 2000(2):26-32.
LI Li-qun, HAN Xiao-jian. Using Ultrasonic Method to Examine the Quality of Concrete-filled Steel Tubes [J]. Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute, 2000(2):26-32.
- [26] 邵 雁, 邓春为, 徐宏武. 超声波钢管砼检测技术及其在巫山长江大桥检测中的应用[J]. 矿业安全与环保, 2005, 32(增1):79-82.
SHAO Yan, DENG Chun-wei, XU Hong-wu. Super-sonic Sounding Technology for Steel Pipe Concrete and Its Application in Detection of Wushan Changjiang River Bridge [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2005, 32(S1):79-82.