

混凝土结构冲击回波声频检测技术体系

(V1.42)



2017-12-22 初稿

2020-09-08 第 37 次修订

2021-02-26 第 38 次修订

2022-02-12 第 39 次修订

四川升拓检测技术股份有限公司

www.scentralit.com

目 录

第 1 章 概述.....	4
1.1 现有混凝土无损检测技术.....	4
1.2 声频检测技术概述：打声（敲击）法.....	5
1.3 声频检测技术：冲击声频回波（IAE）法.....	6
第 2 章 IAE（冲击声频回波）法.....	6
2.1 背景及基本概念.....	6
2.1.1 声波的基本理论.....	7
2.1.2 声波检测与弹性波检测的异同.....	7
2.2 室内模型试验.....	7
2.2.1 室内混凝土试块.....	7
2.2.2 PPR 材料测试.....	8
2.2.3 迎风模拟测试.....	8
2.2.4 第一代隔声筒效果测试（2018.02）.....	9
2.2.5 混凝土孔道灌浆模型（隔音罩优化，2017.10~2018.03）.....	9
2.3 室外结构模型试验.....	10
2.3.1 第一代金属隔音筒测试（2018.03）.....	10
2.3.2 第二代金属隔音筒测试（2018.03）.....	10
2.3.3 第一代塑料隔音筒测试（2018.03~04）.....	错误！未定义书签。
2.3.4 第三代金属隔音筒测试（2018.05）.....	10
2.3.5 声频式混凝土冲击回波仪 I 型模型测试（2018.09）.....	11
2.3.6 实验墙（2018.11）.....	11
2.4 铁路隧道对比验证试验.....	12
2.4.1 概述.....	12
2.4.2 黔张常线（2018.10）.....	12
2.4.3 郑万线重庆段 A、B 隧道（2019.01）.....	14
2.4.4 太焦客专（2019.04，超厚验证）.....	18
2.4.5 川藏铁路（2021.11，IAE 与雷达比对）.....	20
2.5 其它混凝土结构验证试验.....	22
2.5.1 PCCP 管内部缺陷（北京、2019.12）.....	22
2.5.2 公路隧道衬砌对比验证（广西南宁、2020.04）.....	23
2.5.3 建筑立柱结合面缺陷检测（江苏南京、2021.03）.....	23
2.6 IAE 的特点、与地质雷达的比较及提高精度的方法.....	25
2.6.1 IAE 法的特点及与地质雷达的比较.....	25
2.6.2 IAE 与地质雷达的对比验证（昌景黄铁路矿石隧道、2020.08）.....	26
2.6.3 提高 IAE 法测试精度的方法.....	27
第 3 章 AI 辅助提高精度及 BQIM 管理机能.....	27
3.1 概述.....	27
3.2 AI 辅助提高检测精度及自动标注.....	27
3.2.1 基于浅层学习的声频衬砌检测 AI 辅助分析.....	27
3.2.2 基于深度（迁移）学习的铁路隧道衬砌 IAE 检测的 AI 标识.....	28
1.1 冲击回波声频法（IAE）测试图形说明.....	错误！未定义书签。

1.2 衬砌状况及缺陷类型的说明.....	错误！未定义书签。
1.3 缺陷类型的判断.....	错误！未定义书签。



第 1 章 概述

1.1 现有混凝土无损检测技术

针对混凝土结构的无损检测技术，根据其测试媒介主要可以分为以下两大类：

1) 基于冲击弹性波、超声波的检测方法

超声波法和冲击弹性波本质上是一样的（广义上都属于弹性波的范畴），都是在被测物体中通过粒子的微小运动来传播的，因而与材料的力学特性等参数有关。但两种方法由于波长、测试设备的不同而有较大的区别。

超声波法是最早用于混凝土无损检测的方法之一，然近年来超声波相阵技术的出现提高了其缺陷检出能力，但由于其能量小、波长较短、频响性能差且受钢筋、骨料影响大等因素，在混凝土缺陷检测中的应用并不广泛。

冲击弹性波法是自上世纪九十年代后发展起来的方法。由于其受钢筋、骨料影响小，且频响性能好、信号能量大，因此其发展极为迅速。特别是冲击回波法（IE 法）更是得到了广泛的应用。

然而，现有的冲击弹性波、超声波检测均采用的接触式测量，需要在被测物体上安装加速度传感器，利用传感器的输出信号实现振动信号的相关测量。但是，由于传感器系统本身的共振特性，以及接触状态的不良或差异，都有可能导致测试信号的误差。另一方面，由于传感器的固定，需要在静止条件下实施，因此无法应用在连续测试中，进而严重地影响测试效率。

2) 基于电磁波（微波）的检测方法

电磁波在被测体中是通过电场和磁场的相互转换来传播的，其中物体的粒子并不会产生运动。该方法的代表为探地雷达，通过检测材料中诱电性能（介电常数）的不连续性，利用发射的电磁波在不同介质面上的反射来推断结构的内部状态。由于探地雷达激发的信号（电磁波）的一致性好，并可在移动中接收信号，因此该方法在混凝土检测（特别是随到衬砌检测）中也有广泛的应用。

但是，微波受金属介质和水的影响很大，而且对空气不很敏感，因此仅适合于大型空洞的检测，对于微细的接触面脱空检测分辨力很低。

对于干的混凝土和空气（半无限）的界面，微波的反射率为 42%~59%，而对于冲击弹性波，其反射率超过 99.99%。因此，冲击弹性波对脱空更为敏感。

特别当混凝土结构中脱空厚度较小时，微波的反射率还会大幅降低。下图是 400、1600MHz 的混凝土雷达对于不同厚度的脱空层时的反射率以及与冲击弹性波反射率的对

比。其中，微波波速取 100m/us。

可见，电磁雷达对脱空的识别能力会受到脱空厚度的很大影响。此外，当脱空中含有水分时，由于雷达在水界面和空气界面的反射是反向的，存在互相抵消的可能性。因此，混凝土雷达对有限脱空厚度，特别是水、气共存时很容易漏检。

目前，以交通、铁路为代表的土木工程行业对工程无损检测技术的需求也日益迫切，如隧道衬砌的内部缺陷、脱空，无砟轨道的伤损、钢管混凝土的脱空等对结构耐久性，乃至行车安全等均有不利的影响。而且，由于这类基础设施均具有长度长、面积大的特点，因此对无损检测技术不仅要求测试可靠，精度高，而且对测试效率也有较高的要求。其中，隧道衬砌的缺陷、脱空检测的需求尤为迫切。

下表比较了针对混凝土结构的不同无损检测方法，由此可见现有的主流方法均不适合非接触、移动式检测。

表 1-1-1 不同混凝土无损检测方法的对比

方法	对脱空/缺陷灵敏性	非接触式检测	移动式检测
超声波	○	×	×
冲击弹性波	◎	×	×
电磁波	△	△	○

◎：非常好；○：好；△：较差；×：不可

1.2 声频检测技术概述：打声（敲击）法

目前，对于隧道衬砌混凝土缺陷检测用的较多的是以打声法为主，其主要关注测试信号的频率特性(音调)、衰减特性(持续时间)、振幅特性(音强)等的变化。其原理在于

当锤击混凝土结构表面时，在表面会诱发振动，该振动还会压缩/拉伸空气形成声波。因此，该声波的声学特性与诱发的结构振动特性就有密切的关系。通常，在产生脱空的部位，振动特性会发生以下变化：

- (1) 弯曲刚度显著降低，卓越周期增长；
- (2) 弹性波能量的逸散变缓，振动的持续时间变长。

表 1-2-1 剥离/脱空测试各参数的比较

项目	持续时间	卓越周期	最大声强
有剥离时	变长	变长	变大
特征	对边界条件敏感	对厚度敏感	
优点	激振力的影响小		对表层剥离敏感

缺点	受材质、边界条件影响大		要求对激振力归一化
适用结构	周围也剥离	大面积剥离	周围也剥离

根据脱空的面积、厚度等参数，其卓越频率 f_k 可按下式圆板简支模型估算，其中， R_k 为各模态的特征值。可知：

- (1) 不同的激振锤会诱发不同的模态，其卓越频率会发生很大的变化。一般来说，小激振锤可以诱发高阶模态，而大的激振锤则相反。对于深的脱空，应当采用较大的激振锤。
- (2) 卓越频率与脱空的厚度成正比，与脱空的面积成反比。

1.3 声频检测技术：冲击声频回波（IAE）法

为此，我们结合弹性波冲击回波法和打声法的优点，开发了基于声频的非接触、移动式的工程无损检测方法“冲击声频回波法，Impact Acoustic Echo method, IAE”。

该方法对测试结构的测试部位激振并诱发振动以及声响，通过广频域、高指向拾音装置拾取该声音信号，并通过差分处理计算空气柱的加速度。由于该加速度与被测结构表面的加速度有密切的相关关系，因此分析该加速度信号即可达到快速、准确了解测试结构内部情况的目的，避免接触式测试产生的误差，提高测试精度及效率，并可用于移动测试。

本技术的特点在于：

- 1) 采用拾音器相阵；
- 2) 采用差分和积分，在得到空气柱的加速度的同时消减周围噪声；
- 3) 对处理得到的信号进行高分辨力 IE（冲击回波法）分析

经过这段时间的研究开发，技术的可行性已经得到了验证，目前正在开发相关设备。

第 2 章 IAE（冲击声频回波）法

2.1 背景及基本概念

由于基于冲击弹性波的结构缺陷检测技术已经较为成熟，但拾振传感器需要固定在被测体的表面，其安装是影响测试效率以及一致性的瓶颈。另一方面，拾音器则无需接触被测体，可以大大提高测试效率及一致性。因此，本技术的出发点就是利用拾音器代替拾振传感器来拾取被测体的振动信号，并引入 IE 法的分析方法，从而结合两种方法

的优点，研究开发出一套崭新的无损检测技术 IAE（Impact Acoustic Echo）法。

本技术力图解决如下问题：

- 1) 建立声频信号与被测体振动特征的联系；
- 2) 尽可能消除周围噪声的影响；

2.1.1 声波的基本理论

2.1.2 声波检测与弹性波检测的异同

声波检测与弹性波检测的对象均为介质中弹性波的传播规律，测试的也是表面质点的振动特性。所不同的主要有两点，即传感器耦合方式，以及系统的共振特性。

- 1) 传感器的耦合方式

在对弹性波检测时，如果采用加速度传感器，则需要将传感器固定在被测体表面上。然而，不同的耦合方式对固有频率有明显的影响。

另一方面，由于声频检测采用非接触耦合方式，因此其固有频谱特性不会改变。

- 2) 系统的共振特性

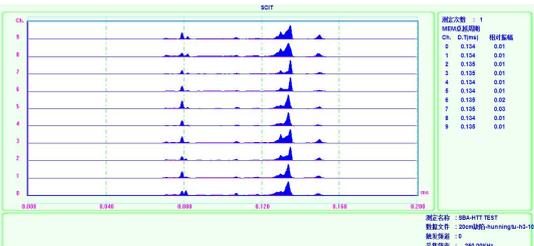
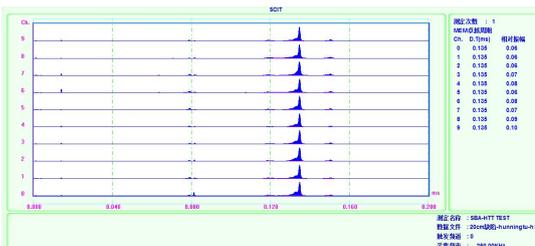
加速度传感器有明显的固有峰值，而拾音器的频谱上一般没有明显的共振峰值。

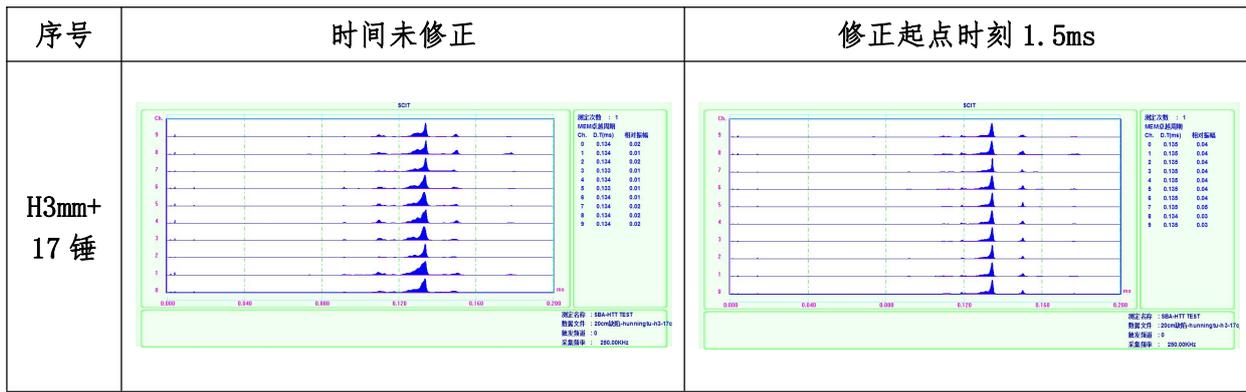
2.2 室内模型试验

2.2.1 室内混凝土试块

我们室内 20cm 厚缺陷混凝土进行了对比测试，本次测试分别采用 10 锤、17 锤进行激振，并变换拾音器与被测对象表面的距离，分别为 3mm、5mm、8mm 的情况下进行测试；测试结果分别采用起点时刻不修正及修正起点时刻 1.5ms。

表 2-2-1 室内混凝土试块测试结果

序号	时间未修正	修正起点时刻 1.5ms																																																																		
H3mm+ 10 锤	 <table border="1" style="font-size: small;"> <thead> <tr> <th>峰值序号</th> <th>峰值时间</th> <th>峰值幅值</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0.124</td><td>0.01</td></tr> <tr><td>1</td><td>0.124</td><td>0.01</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.125</td><td>0.01</td></tr> <tr><td>3</td><td>0.125</td><td>0.01</td></tr> <tr><td>4</td><td>0.124</td><td>0.01</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.124</td><td>0.01</td></tr> <tr><td>6</td><td>0.125</td><td>0.02</td></tr> <tr><td>7</td><td>0.125</td><td>0.02</td></tr> <tr><td>8</td><td>0.124</td><td>0.02</td></tr> <tr><td>9</td><td>0.125</td><td>0.01</td></tr> </tbody> </table>	峰值序号	峰值时间	峰值幅值	0	0.124	0.01	1	0.124	0.01	2	0.125	0.01	3	0.125	0.01	4	0.124	0.01	5	0.124	0.01	6	0.125	0.02	7	0.125	0.02	8	0.124	0.02	9	0.125	0.01	 <table border="1" style="font-size: small;"> <thead> <tr> <th>峰值序号</th> <th>峰值时间</th> <th>峰值幅值</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0.125</td><td>0.02</td></tr> <tr><td>1</td><td>0.125</td><td>0.02</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.125</td><td>0.02</td></tr> <tr><td>3</td><td>0.125</td><td>0.07</td></tr> <tr><td>4</td><td>0.125</td><td>0.02</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.125</td><td>0.02</td></tr> <tr><td>6</td><td>0.125</td><td>0.02</td></tr> <tr><td>7</td><td>0.125</td><td>0.07</td></tr> <tr><td>8</td><td>0.125</td><td>0.02</td></tr> <tr><td>9</td><td>0.125</td><td>0.02</td></tr> </tbody> </table>	峰值序号	峰值时间	峰值幅值	0	0.125	0.02	1	0.125	0.02	2	0.125	0.02	3	0.125	0.07	4	0.125	0.02	5	0.125	0.02	6	0.125	0.02	7	0.125	0.07	8	0.125	0.02	9	0.125	0.02
峰值序号	峰值时间	峰值幅值																																																																		
0	0.124	0.01																																																																		
1	0.124	0.01																																																																		
2	0.125	0.01																																																																		
3	0.125	0.01																																																																		
4	0.124	0.01																																																																		
5	0.124	0.01																																																																		
6	0.125	0.02																																																																		
7	0.125	0.02																																																																		
8	0.124	0.02																																																																		
9	0.125	0.01																																																																		
峰值序号	峰值时间	峰值幅值																																																																		
0	0.125	0.02																																																																		
1	0.125	0.02																																																																		
2	0.125	0.02																																																																		
3	0.125	0.07																																																																		
4	0.125	0.02																																																																		
5	0.125	0.02																																																																		
6	0.125	0.02																																																																		
7	0.125	0.07																																																																		
8	0.125	0.02																																																																		
9	0.125	0.02																																																																		



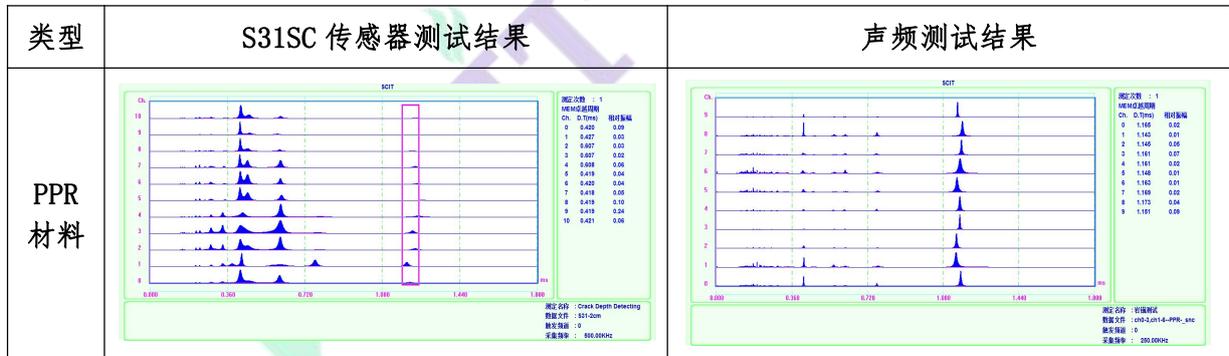
对比，改变拾音器与测试表面之间的距离为 3mm/5mm 时，对于频谱分析底部反射时刻较为明显；通过对原始数据起点时刻的修正与未修正对比，修正以后其结果中底部反射信号更为明显、集中；

2.2.2 PPR 材料测试

我们对室内 PPR 材料进行了对比测试，本次测试分别采用 S31SC 传感器及声频装置进行测试，并比较其频谱图。

通过采用 S31SC 传感器与声频测试对 PPR 材料进行了对比测试，声频测试方法对 PPR 测试效果较好，能较清晰识别底部反射信号。结果表明，在此条件下，IAE 法的分析品质优于 IE 法。

表 2-2-2 PPR 材料对比测试结果表



2.2.3 迎风模拟测试

我们对室内 20cm 混凝土试块进行了模拟迎风测试，通过测试迎风对声频测试结果的影响以模拟测试移动速度对声频测试的影响。本次测试分别采用 10 锤、17 锤对 20cm 厚混凝土密实区域进行测试，同时分别采用风扇低档、高档模拟不同移动速度下对测试结果的影响。结果表明在低档风、高档风的影响下，声频测试对频谱结果仅存在细微影响，对试块底部反射信号几乎没有影响。

2.2.4 第一代隔声筒效果测试（2018.02）

我们利用 20cm、30cm 混凝土试块和 PPR 棒对第一代隔声筒（圆柱直筒形）的效果进行了对比测试。测试结果表明：

- (1) TTL 外触发装置使用效果较好，能满足测试需要；
- (2) 隔音筒有较好的隔离外部噪声效果，其中锥盖对混凝土试块测试作用大；
- (3) 隔音筒若直接放置在被测体表面上，受被测体表面微振动的影响，会产生一个低频信号，但该信号对频谱分析结果影响不大；
- (4) 隔音材料对减小隔音筒内共鸣有作用，但还需进一步优化；
- (5) 隔声筒的设计还需要进一步优化，由直筒形改为倒圆台形，并适当增加筒壁刚度；

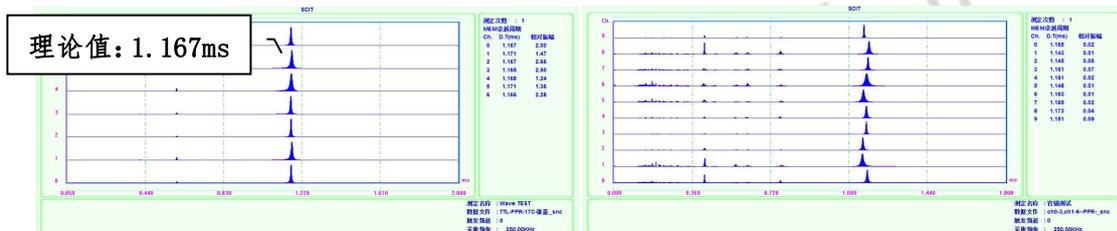


图 2-2-6 108cmPPR 棒测试结果（左：带隔声筒装置，右：无隔声筒）

2.2.5 混凝土孔道灌浆模型（隔音罩优化，2017.10~2018.03）

我们设计了不同形式的隔音筒、隔音垫，并采用 10 锤、17 锤、30 锤对 20cm 厚的混凝土孔道灌浆模型的孔道处、密实度进行了对比测试，结果表明：

- (1) 声频检测对 20cm 带孔道和密实的地方能较好的区别，采用 DB30 锤对测试 20cm 厚混凝土效果不如 DB10/DB17 锤；
- (2) 合成时修正起点时刻后，对数据结果的分辨力有了明显的提高；
- (3) 隔音罩有效地消除了不同位置信号的相互影响。
- (4) 隔音罩的晃动会产生低频信号；
- (5) 隔音垫效果良好，有效地消减了不同位置的相互干扰；

2.3 室外结构模型试验

2.3.1 第一代金属隔音筒测试（2018.03）

对厚度分别为 10、20、30、40cm 的混凝土模型进行了声频（带隔音筒、垫）测试。其中，使用隔音筒时，麦克风也带隔音垫。测试结果表明

- （1） 采用隔音垫、隔音筒，测得的不同厚度的信号频谱有较明显的差异；
- （2） 由于混凝土浇筑质量的原因，离散较大；

2.3.2 第二代金属隔音筒测试（2018.03）

对厚度从 20cm 渐变到 40cm 的混凝土模型梁进行了声频（第二代隔音筒、带隔音垫）测试。采用 TTL 触发，内外隔音、吸音。

2.3.3 第三代金属隔音筒测试（2018.05）

对厚度从 20cm 渐变到 40cm 的混凝土模型梁，以及预应力梁孔道灌浆模型进行了声频（第三代金属隔音筒、带隔音垫）测试。

1) 渐变厚度测试

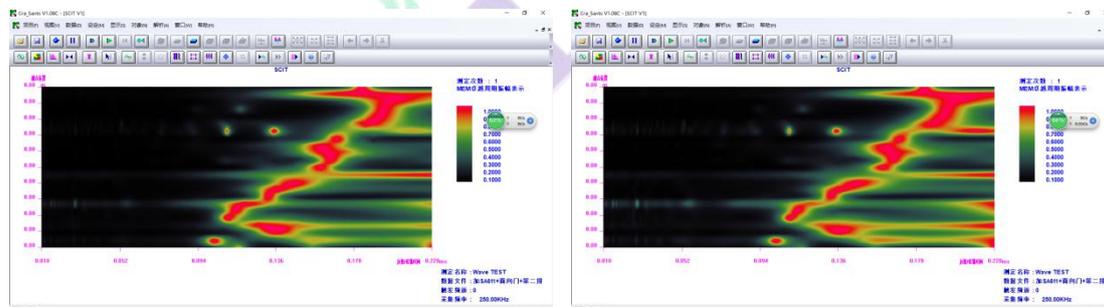


图 2-3-7 面向门第二排 左：无修正前， 右：9.5KHz 修正后

2) 灌浆密实度测试

对灌浆模型 20cm、40cm 厚位置处的 N1、N2、N3、N4、N5 孔道进行测试，采用 17 锤，采集次数设定为 4096，变换时间为 2us；



图 2-3-9 现场测试布置图(左: 20cm, 右: 40cm 厚灌浆段)

3) 实验结论

- (1) 第三代单通道声频装置能很好的测试出模型的渐变效果;
- (2) 针对 20cm 的灌浆模型缺陷, 在测试全空孔道与混凝土密实位置有明显的差异, 孔道内不同缺陷状况(全空、半空、全满)也有较明显的差别。
- (3) 对测试 40cm 厚孔道模型, 能较明显区分混凝土密实与孔道的位置区别; 但对 40cm 厚孔道模型的孔道中不同缺陷状况(全空、上半空、左半空、全满)测试效果不明显。
- (4) 发现模型孔道位置与设计图纸仍存在微小差距, 这也可能是结果分析与设计有差别的原因。

2.3.4 声频式混凝土冲击回波仪 I 型模型测试 (2018.09)

1) 概述

利用开发的基于声频的混凝土冲击回波仪 (I 型), 对混凝土渐变模型进行了测试。

2) 测试结果

可以看出, 经过反复改良, 测试效果十分令人满意。

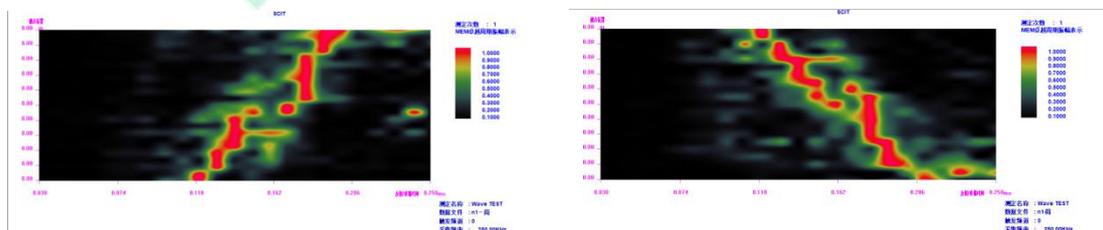


图 2-3-10 N1 测线往返 (D17 激振)

2.3.5 实验墙 (2018.11)

1) 概述

受中铁西北铁科院邀请，我们于 2018 年 11 对某混凝土实验墙进行了检测验证，对比了声频检测技术（IAE）和地质雷达。

2) 试验结果

通过与相关设计资料对比分析，并根据声频检测的位置结果显示，在试验墙体 1.5~2.5m、7.5m、11.5~12.2m、14.5~15.5m、18.8~19.7m 处均存在明显的空洞缺陷，两者在位置上基本吻合；

此外，由于脱空比较明显，直接在 EWR 图上也可以非常明显地看出脱空的位置。

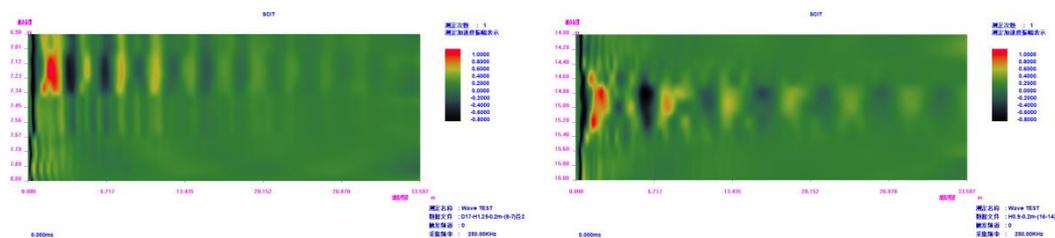


图 2-3-13 EWR 云图

2.4 铁路隧道对比验证试验

2.4.1 概述

IAE 最主要的用途在于隧道，特别是铁路隧道衬砌（二衬）的完整性检测。自 2018 年 8 月以来，我们在以下各个隧道进行了对比、验证检测。

2.4.2 黔张常线（2018.10）

1) 概述

受成都铁路局邀请，我们于 2018 年 10 月参加成都铁路局第三季度红线排查隧道衬砌质量无损检测项目，在检测中对比了冲击弹性波及声频检测技术。其主要目的为：

- (1) 试验声频小车在现场的使用效果并改进声频小车；
- (2) 测试对比声频隔音筒与声频小车的测试效果；
- (3) 测试对比声频隔音筒与 S21SC 对隧道衬砌质量检测的测试效果；
- (4) 对比分析声频检测技术与雷达检测的数据结果。

2) 测试一：A 隧道 声频小车（I 型）稳定性测试

我们于 A 隧道右边墙 DK22+468-DK22+502 段采用声频检测技术（声频小车 I 型）进行了对比测试。

其中 DK22+468-485 段围岩级别为Ⅲ，边墙二次衬砌设计厚度为 40cm，设计混凝土强度等级为 C30；DK22+485-502 段围岩级别为Ⅳ，边墙二次衬砌设计厚度为 40cm，二衬钢筋间距为 20cm，设计混凝土强度等级为 C35。测试结果表明：

- (1) 采用声频检测技术(第一代声频小车 I 型)能较明显的反映结构厚度趋势，但与设计底部反射位置存在一定偏差，疑为衬砌厚度与设计存在偏差导致；
- (2) 声频小车往复两次测试的结果稳定性基本较好，但仍有部分存在偏差，疑为测试过程中隔音效果不好导致。

3) 测试二：A 隧道 声频小车 (I 型) 不同敲击距离测试 (2018. 10. 02)

为测试对比不同激振距离对声频小车检测结果的影响，进行了本次测试，结果表明，声频在不同的敲击距离情况下，整体都较稳定；

4) 测试三：A 隧道 声频与冲击弹性波 (S21SC) 对比测试 (2018. 10. 05)

我们于 A 隧道右边墙 DK22+610-DK22+635 段对冲击回波法 (S21SC) 及声频检测技术 (改良隔音筒) 进行了对比测试，其中 DK22+610-DK22+635 段围岩级别为Ⅴ，边墙二次衬砌设计厚度为 45cm，二衬钢筋间距为 20cm，设计混凝土强度等级为 C35。

- (1) 本次测试位置为雷达已完成扫面测试区域，故于此处分别采用声频检测技术、冲击回波法 (S21SC) 检测技术进行测试，并可与雷达数据进行对比；为确保测试数据稳定可靠，本次测试数据均进行两次平行测试。

5) 测试四：声频法与地质雷达的对比

(1) B 隧道

我们于 B 隧道 DK6+682-DK6+980 段采用声频检测技术 (改良隔音筒) 进行了衬砌缺陷检测，其中，围岩级别为Ⅴ，边墙二次衬砌设计厚度为 50cm，二衬钢筋间距为 20cm，设计混凝土强度等级为 C35。

(2) A 隧道

我们于 A 隧道将剩余段采用声频检测技术 (改良隔音筒) 进行了衬砌缺陷检测，其中大部分数据与雷达数据能基本对应，但个别数据存在异样，如下：

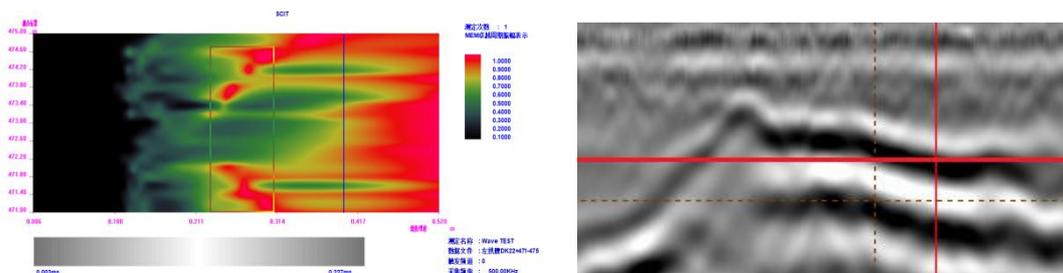


图 2-4-6 左拱腰 DK22+471-475 测试图 (左：声频 右：雷达)

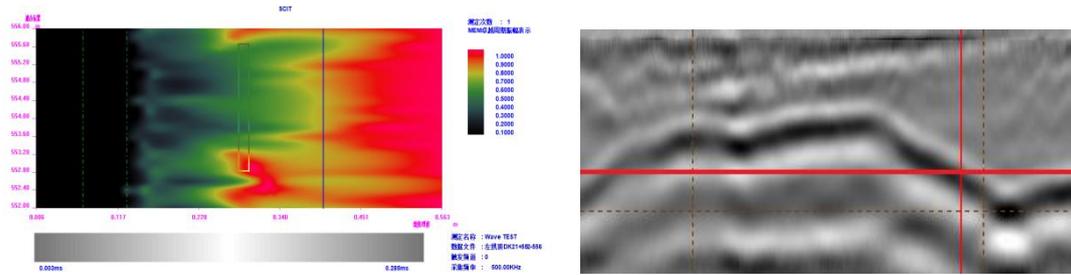


图 2-4-7 左拱顶 DK21+552-556 测试图（左：声频 右：雷达）

通过对比雷达及弹性波数据结果，在衬砌缺陷为背后空洞/厚度不足时，疑似在空洞正上方侧面数据呈现低频，在等值线云图中出现中部不连续的图样；但该信号易造成数据判定异常，故在该异常处可结合原始信号进行判定。

6) 小结

- (1) 因冲击回波法（S21SC）需传感器与被测面紧密结合，其测试效果与接触状态影响较大，而声频检测技术（隔音筒）采用非接触式测试，从上述测试结果可见，在隔音较好的前提下，声频检测技术一定程度上比采用传感器测试更稳定，且信号质量更优；
- (2) 通过将声频测试结果与雷达数据进行对比，雷达图中所呈现的缺陷在声频检测图中均有所呈现，且相对较可靠；但雷达测试双层钢筋时，其钢筋下衬砌质量缺陷受钢筋信号影响大，声频检测也受边界影响较大；后期应注意积累相关数据经验；
- (3) 现阶段声频测试在定点测试时效果较好，但移动或连续测试（试验声频小车）仍存在较大问题，主要体现在按压费劲且容易因四轮不平衡导致隔音筒与被测面不紧密贴合，从而造成噪音混入。

2.4.3 郑万线重庆段 A、B 隧道（2019.01）

1) 概述

受中铁某局集团下属公司邀请，我司于 2019 年 01 月~03 月对郑万铁路重庆段 A、B 隧道衬砌进行了检测。检测主要针对第三方雷达(GRIV 型地质雷达,中心频率为 900MHZ)检测后判定缺陷区域位置，采用 IAE 法进行了复测和验证。

A 隧道拱顶雷达判定 4 处不密实及 1 处轻微脱空。采用 IAE 对这五处进行复测，判定这几处在二衬结构范围内，均不存在脱空及不密实现象。结合设计资料及现场查看，各测试区域均属于 IVa/Va 级围岩，钢筋布置密（间距 0.2m），且位置均为拱顶施工缝与钢质挂线槽的区域，推测对雷达判定存在一定影响。

B 隧道进口拱顶本次共计检测 15 处，经声频检测结果判定在二衬结构内部存在 3 处脱空、3 处不密实、其余 9 处密实。现场开孔验证 11 孔，对比表如下：

表 2-4-12 B 隧道进口（拱顶）开孔验证结果对比表

开孔比较	IAE	地质雷达
完全一致	9	1
基本一致	1	4
不一致	1	6

表 2-4-13 开孔验证结果汇总表（拱顶）

序号	开孔桩号	IAE 法判定缺陷类型	雷达判定缺陷类型	钻孔验证结果
1	DK800+840.3	密实	脱空：深 38~49cm	内部密实，深 60cm 以上与防水板脱空
2	DK800+841.5	超厚、密实	密实	密实
3	DK800+846	密实	不密实	密实
4	DK800+858	脱空	脱空	密实（注-1）
5	DK800+890	密实	轻微脱空：44-51cm	密实
6	DK800+922.5	脱空：深 30cm 左右	轻微脱空：47-54cm	脱空：深 21cm 处
7	DK800+923.5	不密实：30cm 左右	轻微脱空：47-54cm	不密实：深 26cm:
8	DK801+004	密实	不密实	密实
9	DK801+171	脱空：深 30~36cm	轻微脱空：44-53cm	脱空：深 32-34cm
10	DK801+172	密实	轻微脱空	密实
11	DK801+173	密实	轻微脱空	密实

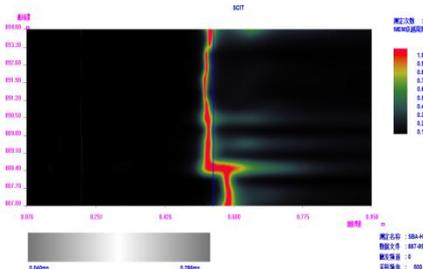
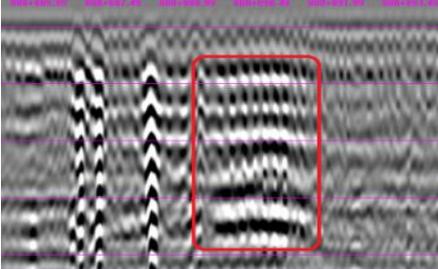
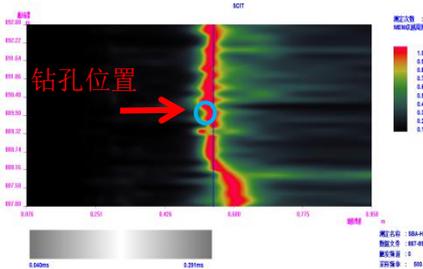
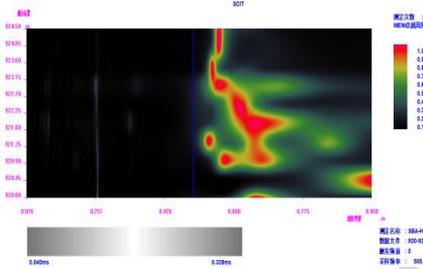
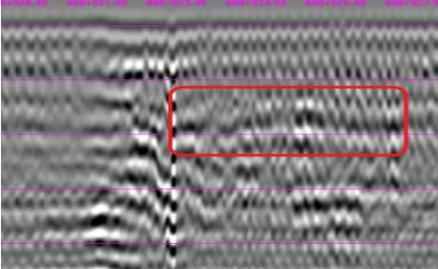
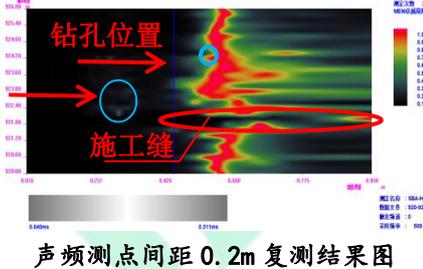
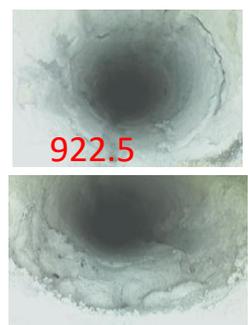
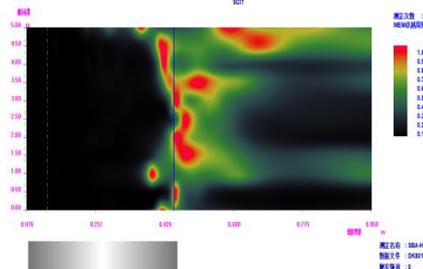
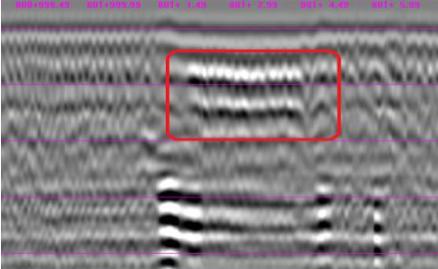
注-1：钻孔位置可能有误。

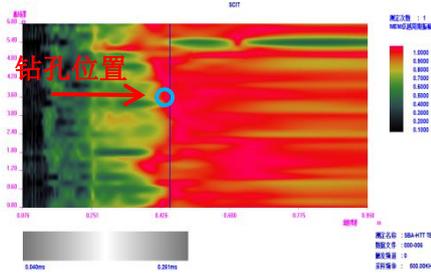
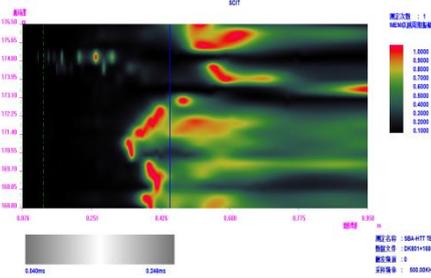
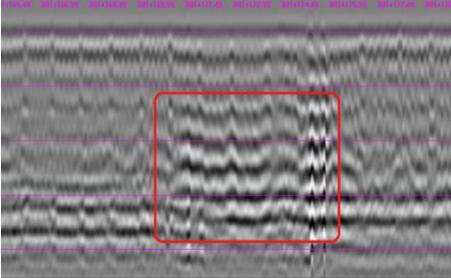
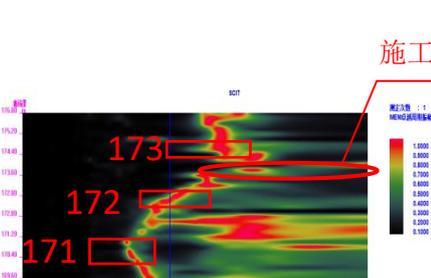
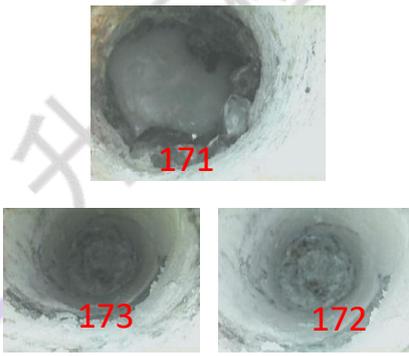
2) 典型波形及验证

表 2-4-14 B 隧道进口（拱顶）冲击回波声频与雷达检测结果

测试位置	冲击回波声频图	雷达检测结果图	备注
拱顶 DK800+838- DK800+843	<p>声频测点间距 0.5m 结果图</p>	<p>雷达检测结果图（脱空）</p>	<p>雷达：脱空 声频：密实、超厚</p>

测试位置	冲击回波声频图	雷达检测结果图	备注
	<p>声频测点间距 0.2m 复测结果图</p>	<p>(设计厚度: 55cm) 钻孔验证结果图</p>	<p>钻孔: 60cm 内均密实+840.3 处 60-70cm 与防水板脱空。</p>
<p>拱顶 DK800+844- DK800+847</p>	<p>声频测点间距 0.5m 结果图</p>	<p>雷达检测结果图 (不密实)</p>	<p>雷达: 不密实 声频: 密实</p>
	<p>声频测点间距 0.2m 复测结果图</p>	<p>钻孔验证结果图</p>	<p>钻孔: 密实</p>
<p>拱顶 DK800+855- DK800+860</p>	<p>声频测点间距 0.5m 结果图</p>	<p>雷达检测结果图 (脱空)</p>	<p>雷达: 脱空 声频: 脱空</p>
	<p>声频测点间距 0.2m 复测结果图</p>	<p>钻孔验证结果图 (/)</p>	<p>钻孔: 密实 钻孔位置可能存在偏差</p>

测试位置	冲击回波声频图	雷达检测结果图	备注
拱顶 DK800+887- DK800+893	 <p>声频测点间距 0.5m 结果图</p>	 <p>雷达检测结果图 (轻微脱空)</p>	雷达: 脱空 声频: 密实
	 <p>声频测点间距 0.2m 复测结果图</p>	 <p>钻孔验证结果图</p>	钻孔: 密实
拱顶 DK800+920- DK800+926	 <p>声频测点间距 0.5m 结果图</p>	 <p>雷达检测结果图 (轻微脱空)</p>	雷达: 轻微脱空, 深度 47-54cm 声频: 不密实及脱空。
拱顶 DK800+920- DK800+926	 <p>声频测点间距 0.2m 复测结果图</p>	 <p>钻孔验证结果图</p>	钻孔: 922.5m 处存在深度为 21cm 脱空; 923.5m 处约 26cm 深度有不密实
拱顶 DK801+000- DK801+006	 <p>声频测点间距 0.5m 结果图</p>	 <p>雷达检测结果图 (不密实)</p>	雷达: 不密实 声频: 密实

测试位置	冲击回波声频图	雷达检测结果图	备注
	 <p>声频测点间距 0.2m 复测结果图</p>	 <p>钻孔验证结果图 004</p>	<p>钻孔：密实</p>
拱顶 DK801+168- DK801+176	 <p>声频测点间距 0.5m 结果图</p>	 <p>雷达检测结果图 (轻微脱空)</p>	<p>雷达：轻微脱空 声频：脱空</p>
	 <p>声频测点间距 0.2m 复测结果图</p>	 <p>钻孔验证结果图</p>	<p>钻孔： +171：深度 32-34cm 脱空； +172、173：钻 至 40cm 密实</p>

2.4.4 太焦客专 (2019.04, 超厚验证)

1) 概述

受相关单位邀请，我们对太焦客专某隧道进行了检测。其中，对于疑似超厚和脱空位置进行了钻孔验证。其中，关于反射信号明显滞后的特征与判定如下。

2) 滞后明显 (滞后超过设计值 50%以上)，急剧变化，附近测线前方有微弱反射

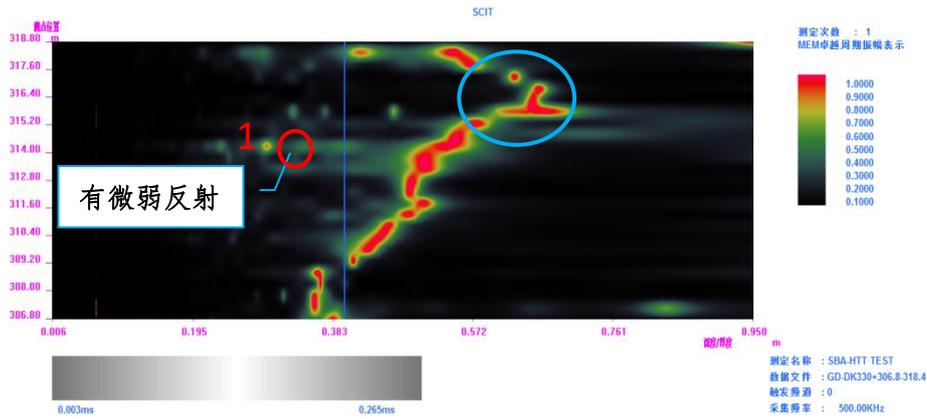


图 2-4-18 滞后明显云图

→ 分析：考虑混凝土不密实

→ 钻孔：设计 40cm，实测 62cm，无不密实

【说明】：

- (1) 云图出现的微弱信号可能为噪音，且仅一点出现，而后面信号比较连续；
- (2) 采用海明窗与未加海明窗的等值线图对比如下，可见上图圈 1 处的微弱信号变得极其微弱，但在另一位置出现了一个较微弱信号（圈 2），可见海明窗可能对噪声部分加强才产生了该微弱信号（圈 1）：

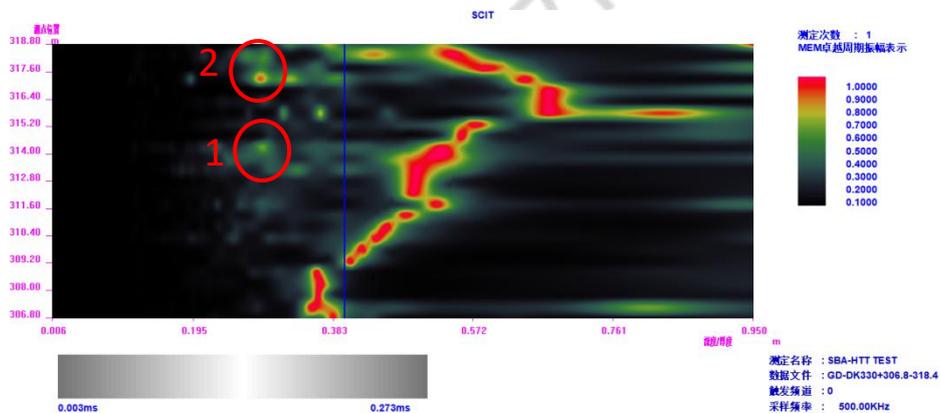


图 2-4-19 滞后明显云图

3) 滞后明显（滞后超过设计值 50%以上），急剧变化，相应测线前方有微弱反射

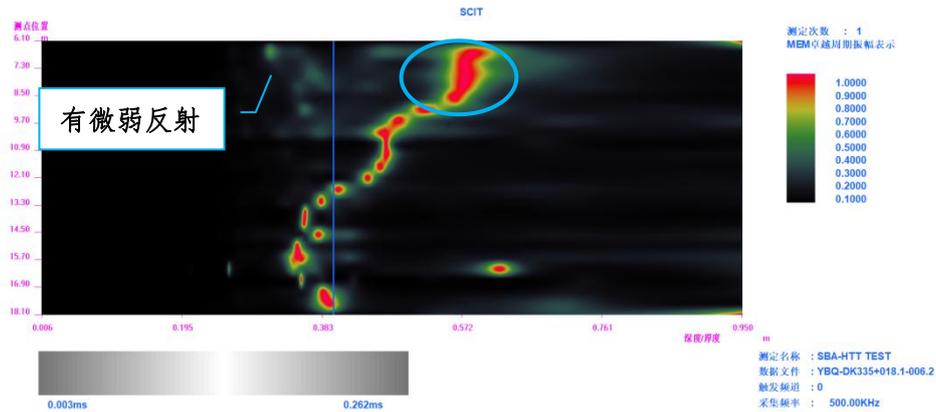


图 2-4-19 滞后明显云图

→ 分析：考虑混凝土不密实、有内部空洞

→ 钻孔：007 位置设计 40cm，此处实测 62cm，无空洞等情况

4) 滞后较明显（滞后不到设计值 50%），连续变化，相应测线前方无反射

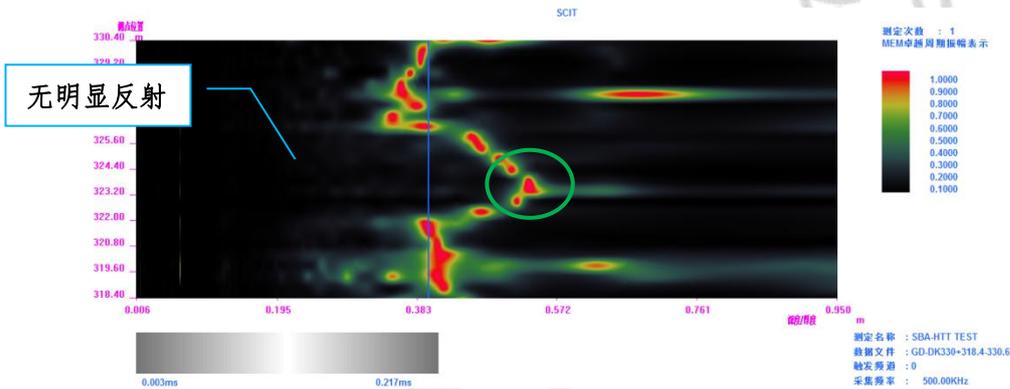


图 2-4-19 滞后较明显云图

→ 分析：衬砌超厚

→ 钻孔：323 位置设计 40cm，此处实测 60cm，为超厚。

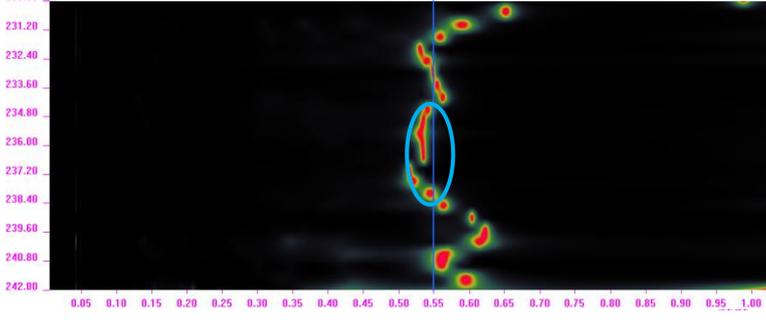
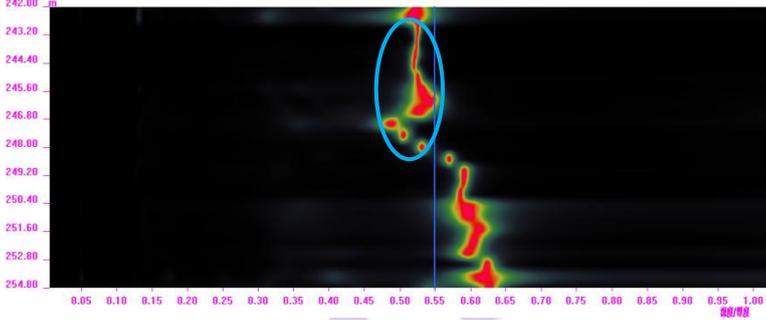
2.4.5 川藏铁路（2021.11，IAE 与雷达比对）

受川藏铁路某单位邀请，我司技术人员采用冲击回波声频法（IAE 法）与其他单位的探地雷达法对川藏铁路某标段高原隧道衬砌进行内部缺陷比对检测。

川藏铁路位于国道 318 附近，海拔普遍较高（大于 3000 米），地质围岩复杂（二衬设计厚度普遍大于 55cm）。通过两种方法在同测线位置的检测，冲击回波声频法发现两处长度约 2-5 米的脱空不密实缺陷，雷达检测判定无缺陷。为了确定检测方法的可靠性，现场对缺陷位置采用内窥镜和钻孔进行验证。检测结果及验证情况请参考表 2-4-21。

表 2-4-21 IAE 法检测结果及判定说明

序号	IAE 法检测结果图	判定及验证说明
----	------------	---------

序号	IAE 法检测结果图	判定及验证说明
1		<p>判定结果: DKxx+235.5-237.5 存在脱空不密实, 缺陷距表面 52-54cm。 其中: 钻孔位置+237.5 判定混凝土有效厚度 52cm, 后为脱空不密实。</p>
2		<p>判定结果: 左拱顶 DKxx+242-247 存在脱空不密实, 缺陷距表面 49-52cm。 其中: 钻孔位置+247 判定混凝土有效厚度 49cm, 后为脱空不密实。</p>
		<p>经钻孔验证: 钻孔位置+247, 实际验证厚度 49cm, 后部存在脱空不密实, 可见防水板。</p>

经过检测:

- 1) IAE 法现场检测操作简单, 检测效率高;
- 2) IAE 法成图直观明了, 对厚度判断准确, 可满足纵/环向检测, 检测精度较高, 可指导钻孔取芯, 最大可检测到 1.5m 衬砌深度;
- 3) IAE 法对高原隧道, 地质围岩条件复杂情况隧道均能满足现场检测;
- 4) 经现场即检及验, 得到业主和施工方对我们测试精度的高度认可, IAE 法后期写进川藏铁路质量管理办法中。

2.5 其它混凝土结构验证试验

2.5.1 PCCP 管内部缺陷（北京、2019.12）

1) 概述

受相关单位委托，对南水北调某引水隧道的 PCCP 管内部缺陷进行了测试和验证。如下图所示，PCCP 管由混凝土、钢筒、砂浆保护层和环氧涂层等构成，结构比较复杂。



图 2-5-1 PCCP 管结构示意图

引水隧洞

2) 典型图像



图 2-5-2 健全部位的 IAE 检测云图

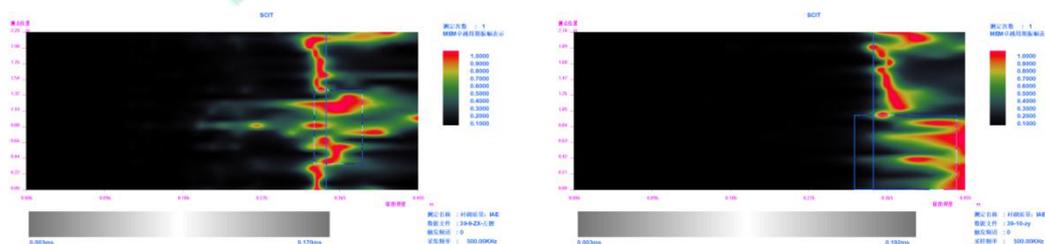


图 2-5-3 缺陷部位（左：混凝土不密实，右：浅层脱空）的 IAE 检测云图

3) 小结

(3) 检测对象为预制的 PCCP 管，中间有一层 0.15cm 钢板，从实际测试情况来

看，密实位置的检测效果很好，钢板对弹性波信号的影响较小。

- (4) 所测隧洞拱顶已开挖，外层砂浆混凝土鼓包、裂缝缺陷位置同实际检测结果能相对应；

2.5.2 公路隧道衬砌对比验证（广西南宁、2020.04）

应长沙理工大检测公司邀请，我司于2020年04月对广西某高速公路某隧道衬砌进行了厚度、缺陷检测演示，并对部分位置进行了钻孔验证。

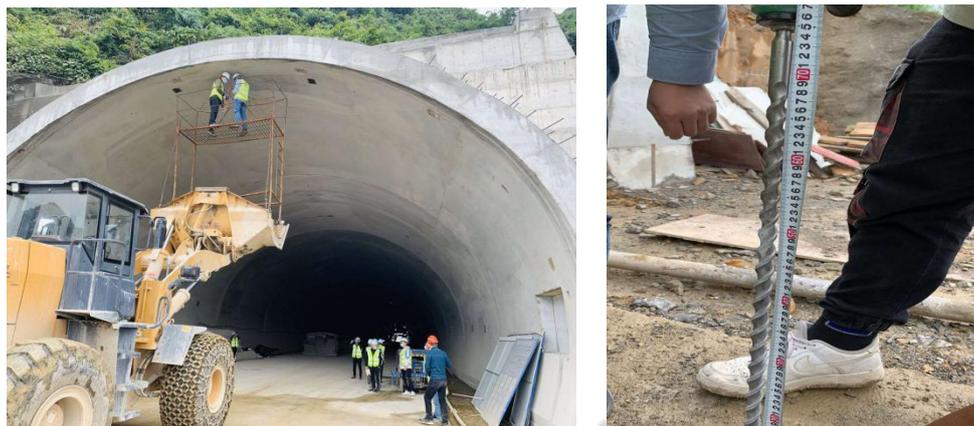


图 2-5-4 现场检测及验证照片

本次对该高速公路某隧道检测 1 条拱顶测线，合计 57 米。

表 2-5-2 某隧道衬砌缺陷检测结果汇总表

序号	检测部位	里程范围	缺陷长度(m)	缺陷类型	缺陷距表面(cm)	设计厚度(cm)	备注
1	拱顶	DK117+845~849	4.0	欠厚	54~56	70	钻孔验证，判定54cm, 实测 55cm。
2	拱顶	DK117+849~852	3.0	不密实	55~59	50	/
3	拱顶	DK117+859~863	4.0	脱空欠厚	39~50	50	钻孔验证，判定40cm, 实测 40cm。
4	拱顶	DK117+971~973	2.0	脱空欠厚	34~40	40	/
5	拱顶	DK47+977~981	4.0	脱空欠厚	30~40	40	/

2.5.3 建筑立柱结合面缺陷检测（江苏南京、2021.03）

受江苏方建委托，我公司对南京市浦口区某混凝土墩柱缺陷进行检测。根据提供的资料，该立柱为分期浇筑结构（在立柱周围再次浇筑混凝土），因怀疑结合面浇筑质量，进行本次检测。根据相关资料，混凝土墩的设计强度为 C30，达到龄期要求。根据现场情况，检测时，分别按照测线的方式布置并测试，共检测测线 15 条。检测测线布置请

参考图 2-5-7。典型检测结果请参考表 2-5-3，并将分析结果进行三维处理，结果图请参考图 2-5-7。

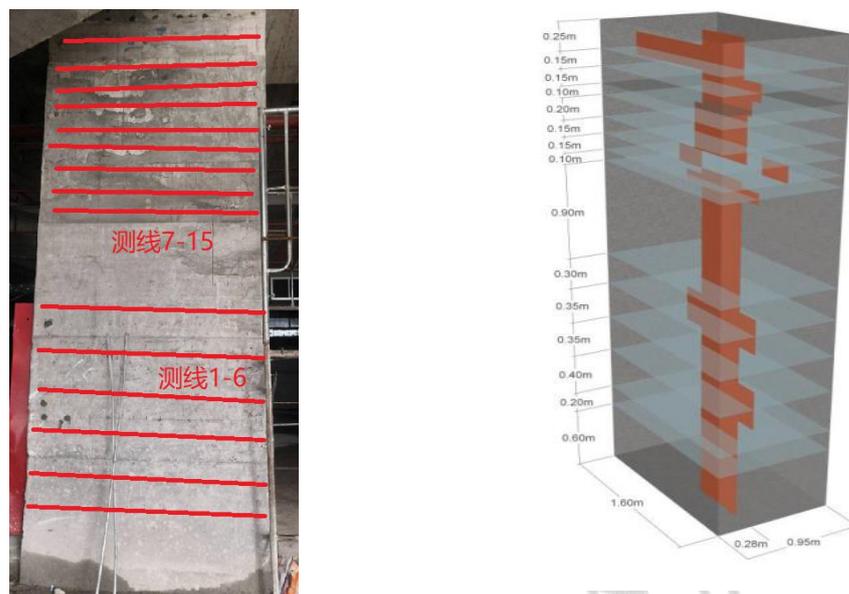
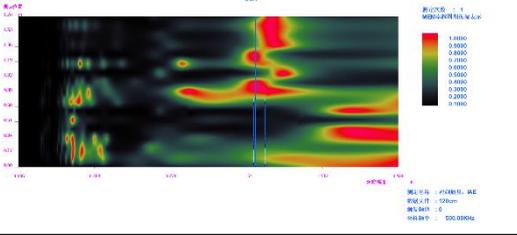
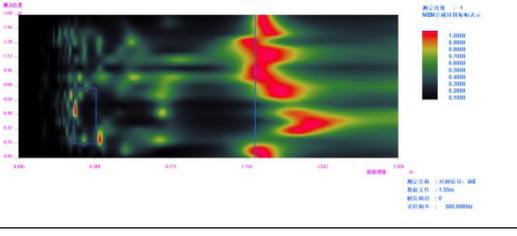
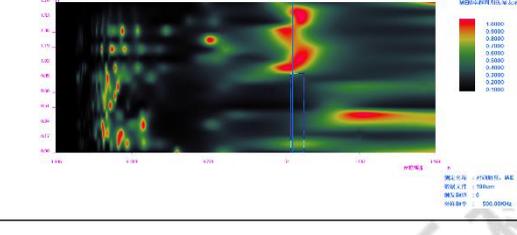


图 2-5-7 现场测线布置图及三维结果图

表 2-5-3 部分检测结果

测线	剖面	检测结果	备注
	方柱标定		标定波速 3.84km/s
测线 1	距柱底 0.6m		0.2-0.7m 浅层脱空， 脱空深度为 28cm 左右
测线 2	距柱底 0.8m		0.2-0.7m 浅层脱空， 脱空深度为 28cm 左右

测线 3	距柱底 1.2m		0-0.8m 浅层脱空, 脱空深度为 28cm 左右
测线 4	距柱底 1.55m		0.2-0.7m 浅层脱空, 脱空深度为 28cm 左右
测线 5	距柱底 1.9m		0-0.9m 浅层脱空, 脱空深度为 28cm 左右

通过检测，可以看出：

- 1) 结合标定数据，该混凝土墩的结合面存在缺陷，与实际吻合。
- 2) 非接触式的冲击回波声频法能够有效对混凝土结构的结合面缺陷进行检测。

2.6 IAE 的特点、与地质雷达的比较及提高精度的方法

2.6.1 IAE 法的特点及与地质雷达的比较

IAE 作为一种崭新的无损检测技术，具有以下特点：

- (1) 采用非接触式的信号采集方法，杜绝了接触造成的共振频率，提高测试稳定性、重复性和可靠性；
- (2) 采用 IE 法的分析手段，进而提高对缺陷的检出能力及适用范围；
- (3) 检测结果图识别简单，明了，并支持 AI 判断。

总体而言，IAE 法是 IE 法的升级版，在大多数情况下较 IE 法具有优势。同时，地质雷达与 IAE 法具有良好的互补性：

雷达法的优势在于检测效率高，每分钟可测 10m 左右，还可以透过防水板，测试初支的状况。而其劣势在于受钢筋网的影响大、对表层脱空、薄层脱空、混凝土不密实以及水、气共存时的缺陷不敏感；

IAE 法的优缺点恰好与雷达法互补，受钢筋、水分影响小，对脱空及缺陷的检测分

分辨率高。但测试效率较低、同时受防水板的影响，难以测试初支及背后岩体状况。

2.6.2 IAE 与地质雷达的对比验证（昌景黄铁路、2020.08）

应中铁八局邀请对昌景黄铁路某隧道衬砌进行了厚度、缺陷检测演示，本次检测隧道设计强度为 C35，地处安徽黄山境内，因混凝土配合中含有铁矿石等物质，且衬砌中还有双层钢筋网，地质雷达无法对衬砌厚度及背后缺陷进行准确检测，故特采用冲击回波声频法进行对比验证。

本次与雷达对比检测衬砌拱顶测线共计约 36 米，合计发现缺陷 1 处。

表 2-6-7 冲击回波声频与雷达法结果对比表

位置	冲击回波声频图	雷达检测结果图	备注
拱顶 DKXX+22 6-238	<p>设计厚度线</p> <p>声频检测结果图（厚度轮廓明显）</p>	<p>雷达图（图像不明显，无法判识）</p>	超厚、无缺陷
拱顶 DKXX+23 8-248	<p>设计厚度线</p> <p>声频检测结果图（厚度轮廓明显）</p>	<p>雷达图（图像不明显，无法判识）</p>	超厚、无缺陷
拱顶 DKXX+24 8-260	<p>圈内区域脱空</p> <p>声频检测结果图（厚度轮廓明显）</p>	<p>雷达图（图像不明显，无法判识）</p>	存在脱空

可见，相比与雷达检测设备（受矿石及钢筋影响），对含矿石隧道的衬砌质量检测 IAE 法具有更明显的优势，能清晰的对衬砌厚度及轮廓反映。

2.6.3 提高 IAE 法测试精度的方法

在 IAE 法的实际测试过程中，最重要的是

- 1) 保障隔音筒对外界声响的隔绝；
- 2) 保障隔音筒与被测面的垂直。

第 3 章 AI 辅助提高精度及 BQIM 管理机能

3.1 概述

为了更有效地对检测信息加以管理，也对检测工作加以监督，我们开发了升拓检测数据库系统 CI-DBS (Central Inspection Data Base System) 以及建筑质量及健康信息模型系统 (BQIM)。该系统具有如下机能：

- 1) GPS 机能及远程无线传送
- 2) 数据库机能及检测信息可视化
- 3) 基于 AI (人工智能) 的辅助提高检测精度

详细资料可参阅“SCIT-1-TEC-12-工程质量及健康信息模型系统(BQIM)”。

数据库网站网址：www.scitdbc.com

3.2 AI 辅助提高检测精度及自动标注

我们采用机器学习（浅层学习和深度学习），针对 IAE、KAS 的检测数据进行训练和建立模型，以不断提高检测的判识精度和自动化水平。

3.2.1 基于浅层学习的声频衬砌检测 AI 辅助分析

- 1) 模型概述

我们针对隧道衬砌内部缺陷的声频检测，提取了相关参数，并引入机器学习建立了预测模型。采用的主要方法有随机森林 (RF)、贝叶斯网络 (BN) 和多层感知 (亦即人工神经网络, MP/ANN) 并采用集合学习的方法以进一步提高精度。

- 2) 训练数据 (截止 2019.05)

- (1) 对象：铁路隧道

(2) 有效数量: 2231 (其中, SOUND: 1636; DEFECT: 595)

(3) 设计壁厚范围: 0.40~0.55m

对训练数据, 采用 10 折交叉验证 (10-fold-Cross-Validation), 结果如下:

(1) 整体精度在 83~89%, 其中, 随机森林和贝叶斯网络的表现相对更好;

(2) 采用 SMOTE 方法对缺陷 (DEFECT) 数据进行增强 (DEFECT 数据从 595 增加到 1190 个, 总数据由 2231 增至 2826), 有明显效果;

(3) 随机森林和贝叶斯网络的表现最好, 准确率可达 86~90%。对缺陷的检出率 (DDR) 可达 71~86%, 对健全部位的误检率为 5~10%。

3.2.2 基于深度 (迁移) 学习的铁路隧道衬砌 IAE 检测的 AI 标识

1) 基本原理

我们采用预训练的 Tiny Yolo (Joseph Redmon&Ali Farhadi) v2 作为基础模型, 更换分类层, 然后在自定义数据集上微调新的分类器并形成模型。

此外, 针对同一区域被多次重复识别的问题, 我们采用 (Non-Maximum Suppression, 简称 NMS 算法) 来解决该问题。

2) 典型图例

结合 AI 的学习, 已经能够从等值线云图中自动标识缺陷的类型。目前, 针对铁路隧道衬砌, 可以自动识别以下超厚、欠厚、脱空、不密实等缺陷类型, 而且可以给出置信度。

结语与致谢

基于声频的无损检测技术具有快速、移动、非接触等特点, 是我公司倾情打造的一代结构无损检测技术。

现阶段, 该技术仍处于原型验证阶段, 我们衷心期望该技术能够尽快走向实用阶段, 能够为我国工程建设质量的提高贡献自己的力量。

最后, 衷心向各位合作伙伴以及关心、支持我们的各位朋友表示诚挚的谢意!

技术支持

- ✘ 本资料为内部资料，仅供本公司及相关单位人员参考。未经本公司许可，任何单位和个人不能下载、阅读以及转载；
- ✘ 有关本资料相关的任何疑问，请咨询：
 - ✘ 四川升拓检测技术股份有限公司 客服咨询专线
 - ✘ TEL: (028)6861-1507、6861-1511、6861-1527
 - ✘ MAIL: Support@scentralit.com
 - ✘ HTTP: www.scentralit.com
- ✓ 有关本资料概要版的最新更新，可在本公司网站的下载中心下载：
http://www.scentralit.com/download_201003181343459218.html

