

# 混凝土结构手机巡检技术体系

## (V1.10)



2020-04-11 初稿

2021-04-28 第7次修订

2021-05-31 第8次修订

2021-11-05 第9次修订

---

四川升拓检测技术股份有限公司

[www.scentralit.com](http://www.scentralit.com)

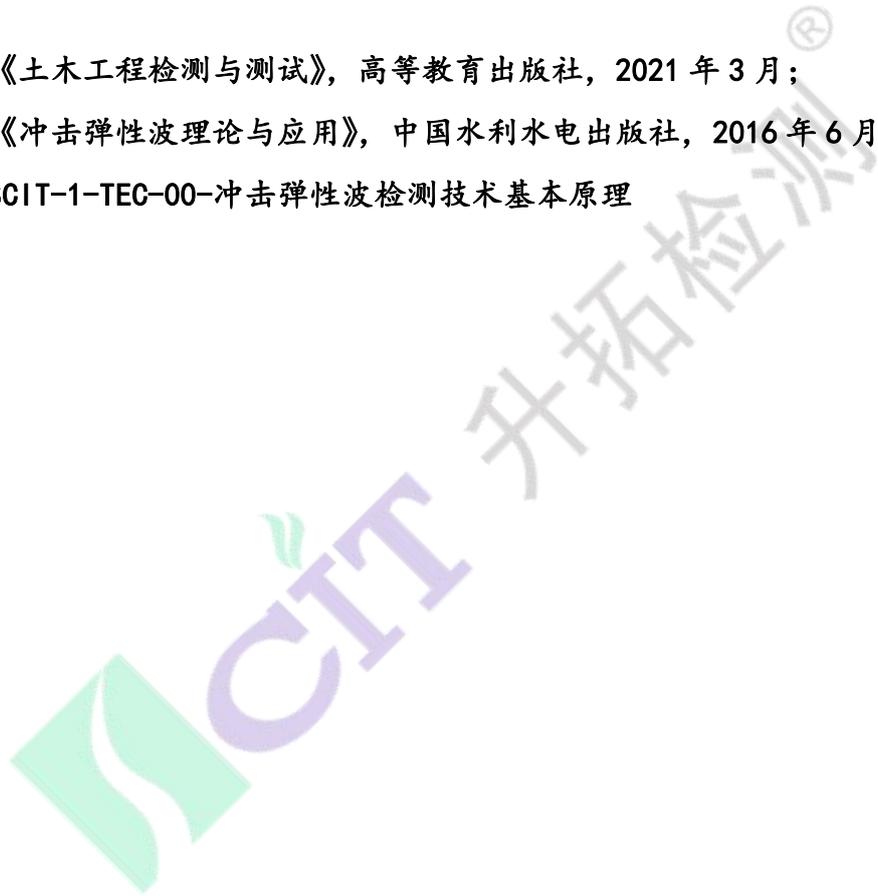
---

## 本报告对应设备

- 1、 敲击式隧道衬砌缺陷检测仪（STL-KAS）B/P 型
- 2、 敲击式钢管混凝土脱空检测仪（SPC-KAS）
- 3、 混凝土结构缺陷检测仪（SCE-PSS）B 型
- 4、 预应力检测巡检仪（SPT-PSS）B/E 型

## 参考资料

- 1、 《土木工程检测与测试》，高等教育出版社，2021 年 3 月；
- 2、 《冲击弹性波理论与应用》，中国水利水电出版社，2016 年 6 月；
- 3、 SCIT-1-TEC-00-冲击弹性波检测技术基本原理



# 目 录

简略语.....	5
术语.....	5
符号说明.....	5
第 1 章 综述.....	6
1.1 手机巡检仪机能概述.....	6
1.2 穿戴式巡检设备概述.....	7
1.3 自动生成报告书机能.....	8
第 2 章 混凝土结构浅层缺陷检测.....	9
2.1 概述.....	9
2.1.1 技术背景：打声（敲击）法.....	9
2.1.2 基本原理.....	10
2.2 技术说明.....	11
2.2.1 标定.....	11
2.2.2 测试.....	11
2.2.3 流程.....	11
2.2.4 降噪.....	12
2.2.5 大体积混凝土脱空阈值的自动判定.....	13
2.3 模型试验.....	14
2.3.1 钢管混凝土模型.....	14
2.3.2 钢管混凝土模型：外接麦克风对比（成都，2019.03）.....	18
2.3.3 隧道衬砌模型：一致性对比（成都、2019.04）.....	19
2.3.4 地坪脱空检测（成都、2019.07）.....	21
2.3.5 钢管混凝土模型：激振锤及敲击力度验证（成都，2019.07）.....	21
2.3.6 隧道衬砌模型：缺陷检测验证（成都、2019.07）.....	23
2.3.7 混凝土缺陷模型：内、外置麦克风对比验证（成都、2019.11）.....	25
2.3.8 混凝土底板缺陷检测（四川交通职业技术学院，2021.03）.....	26
2.4 现场应用及验证.....	27
2.4.1 钢管结合面脱空检测（2020.06，郑州）.....	27
2.4.2 铁路隧道衬砌质量检测（2021.01，郑万铁路）.....	29
2.4.3 铁路隧道衬砌质量检测（2021.04，成自宜铁路）.....	31
2.4.4 铁路隧道衬砌质量检测（2021.05，郑万铁路）.....	33
2.5 特点及提高精度的方法.....	35
2.5.1 特点.....	35
2.5.2 提高精度的方法.....	35
第 3 章 裂缝检测.....	37
3.1 概述.....	37
3.1.1 混凝土结构裂缝的危害.....	37
3.1.2 混凝土结构裂缝的成因.....	38
3.1.3 混凝土结构裂缝的容许值.....	40
3.2 混凝土裂缝识别及勾勒.....	42

3.3	混凝土裂缝宽度测试及统计.....	42
3.4	混凝土裂缝开口深度测试.....	43
3.4.1	混凝土结构裂缝开口深度测试原理.....	43
3.4.2	混凝土结构裂缝开口深度测试例.....	44
3.5	基于 AI 的冷缝识别.....	44
3.5.1	基本原理.....	44
3.5.2	冷缝识别 APP.....	46
第 4 章	紧固件检测机能.....	48
4.1	概述.....	48
4.2	钢筋连接套筒检测.....	48
4.2.1	测试对象及内容.....	48
4.2.2	测试及分析结果.....	49
4.3	精轧螺纹钢锚固（灌浆）质量检测.....	50
4.3.1	测试对象及内容.....	50
4.3.2	数据采集及分析.....	50
第 5 章	IE 法结构厚度、缺陷检测.....	52
5.1	概述.....	52
5.2	试验验证.....	52
5.2.1	混凝土梁厚度检测（四川交通职业技术学院，2021.03）.....	52
5.2.2	混凝土梁灌浆缺陷、厚度检测（贵州交通职业技术学院，2021.03）.....	53
第 6 章	锚杆检测.....	54
6.1	概述.....	54
6.2	试验验证.....	54
6.2.1	锚杆模型检测（四川交通职业技术学院，2021.03）.....	54
第 7 章	基桩小应变检测.....	56
7.1	概述.....	56
7.2	试验验证.....	56
7.2.1	手机基桩低应变测试（贵州交通职业技术学院，2021.03）.....	56
第 8 章	其它常用检测.....	58
8.1	基于 AI 的钢筋等棒状构件计数.....	58
8.2	钢筋直径及保护层厚度测试.....	58
	结语与致谢.....	60
	版本修订说明.....	61
	技术支持.....	62

---

## 简略语

IE: Impact-echo method, 冲击回波法, 详细资料可参见

FFT: Fast Fourier Transform, 快速傅立叶变换

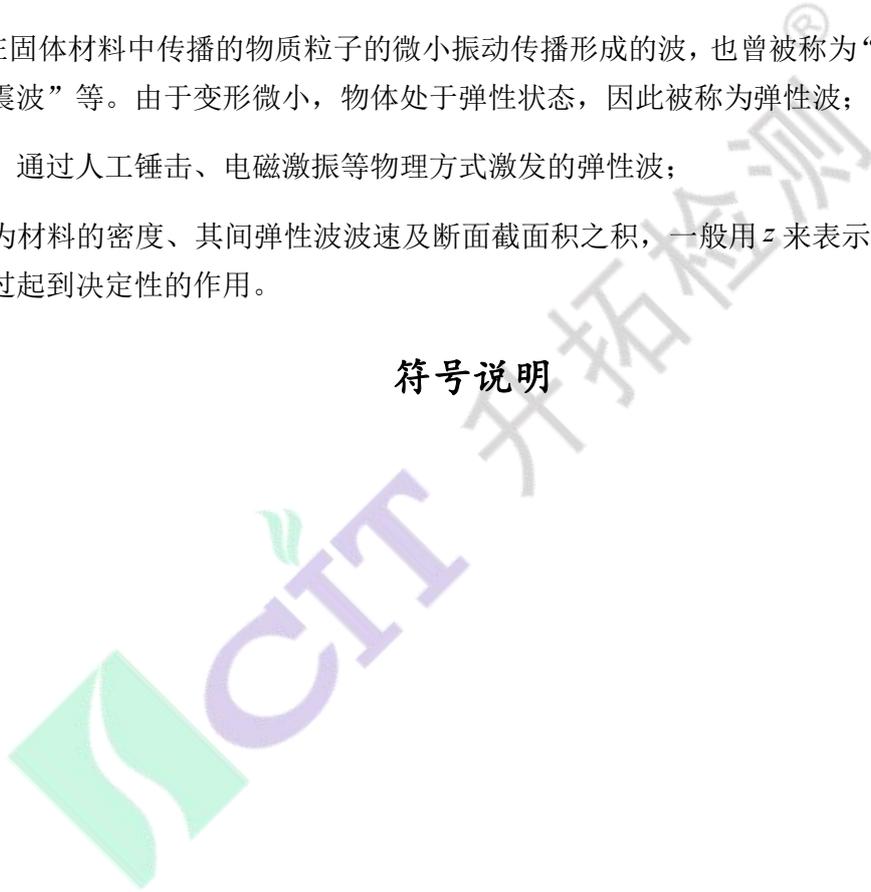
## 术语

弹性波: 是在固体材料中传播的物质粒子的微小振动传播形成的波, 也曾被称为“机械波”、“应力波”、“地震波”等。由于变形微小, 物体处于弹性状态, 因此被称为弹性波;

冲击弹性波: 通过人工锤击、电磁激振等物理方式激发的弹性波;

机械阻抗: 为材料的密度、其间弹性波波速及断面截面积之积, 一般用  $z$  来表示。其对弹性波的反射和透过起到决定性的作用。

## 符号说明



# 第 1 章 综述

## 1.1 手机巡检仪机能概述

随着智能手机性能的不不断提升，越来越成为了人们生活中不可或缺的一部分。在此，我们利用手机的录音、拍摄，内置传感器以及外接功能，开发了一系列基于智能手机的快速巡检设备体系，具体包括：

- 1) 混凝土结构浅层缺陷检测：结合敲击法，利用手机的声频录音和分析机能可以简单地对隧道衬砌表层、钢管混凝土的脱空等进行检测。该方法称为手机声频敲击法（KAS, Knocking Acoustic test by Smartphone）法；
- 2) 裂缝检测，具体包括：
  - (1) 裂缝识别及轮廓勾勒
  - (2) 裂缝宽度测试及统计
  - (3) 开口裂缝深度检测
- 3) 张力检测，具体包括
  - (1) 空置拉索、拉杆张力检测
  - (2) 精轧螺纹钢张力检测
- 4) 钢筋位置及保护层厚度检测
- 5) 大口径浆锚灌浆检测



图 1- 1-1 手机采集截屏

该检测巡检设备使用方便，分析快捷且具备强大的图形绘制、报告书生成等机能，同时还具备与数据库、AI 等后台支持接口，方便扩展。

## 1.2 穿戴式巡检设备概述

为了提高巡检效率和安全性，我们在手机巡检系统中配置了穿戴式巡检设备，从而实现了单手、连续操作（检测）等机能。具体配置包括：

### (1) 头戴式麦克风



图 1- 2-1 头戴式麦克风（左：有线式；右：无线式）

### (2) 冲击锤（及蓝牙模块）



图 1- 2-2 连续采集用激振锤及信号传送用蓝牙手表

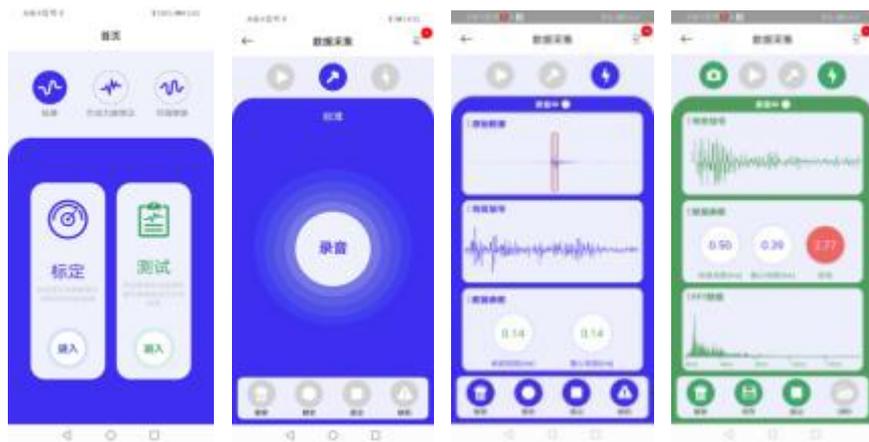


图 1- 2-3 连续采集截屏

### 1.3 自动生成报告书机能

为了进一步提高作业效率，我们在手机巡检系统中配置了自动生成报告书机能，可以快速、方便地生成所需格式的报告书。



图 1- 3-1 自动生成的报告书截屏

## 第 2 章 混凝土结构浅层缺陷检测

### 2.1 概述

利用手机的录音和分析功能，结合敲击法，可以简单地对隧道衬砌表层、钢管混凝土的脱空等浅部缺陷进行检测。该方法被称为手机声频敲击法（KAS, Knocking Acoustic test by Smartphone）法。

#### 2.1.1 技术背景：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。

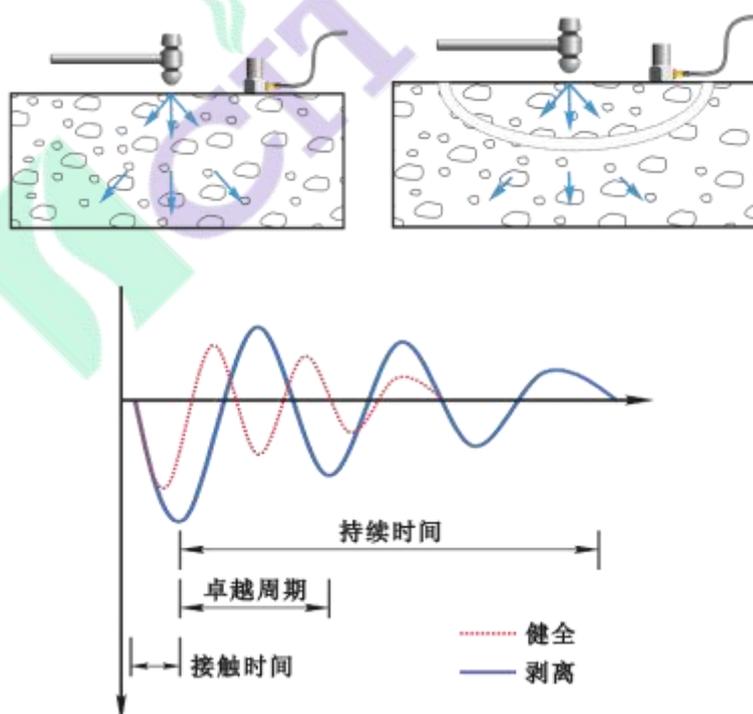


图 2- 1-1 剥离/脱空时振动参数的变化特点

上述指标（卓越周期、持续时间和最大加速度）的比较如下所示。

表 2-1-1 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

尽管该方法具有悠久的历史，但其具有如下缺点：

1) 在噪声环境下适应性差

在实际检测时，如果周围环境噪声较大（如换气扇、马达、其它作业的敲击声残留等），对测试和判断影响大。

2) 难以定量、精度较差且无法保存

影响测试结果的因素众多，特别是敲击力度的影响大。因此，对缺陷/脱空判断的阈值和基准，往往依赖于测试人员主观判断，具有较大的人为误差。价值由于检测人员的疲劳，听力和判断力都会下降，进一步降低检测精度。

此外，由于单纯依赖人工判断，对测试数据无法保存，进而难以回溯。

3) 难以检测深处脱空和缺陷

大量的实践表明，打声法测试的有效深度一般在 10cm 之内，而大型脱空的深度往往超过这个深度。

综上所述，尽管打声法具有测试简便、效率高等优点，但其使用也被局限在初步检查等领域。因此，为方便进行工程质量评估，亟需一种经过验证且可靠性较高的技术手段，为质量评估提供技术支撑。为此，我们开发了基于手机与敲击（打声法）结合的技术，提升了检测客观性和作业性，并可以保存数据和回溯。

### 2.1.2 基本原理

手机声频测试的基本原理与振动法测试脱空相同。

由于振动法测试脱空涉及到多个参数，如持续时间、卓越周期等，而且缺乏绝对性阈值。为了归一化相关参数，我们引入了脱空指数，某点  $i$  的脱空指数  $S_i$  的定义如下：

---

$$S_i = (S_{i1} \cdot S_{i2} \cdots S_{iN})^{1/N}$$

其中， $S_{ik}$  即表示根据第  $k$  个参数得到的分项指数。理论上讲，健全部位的脱空指数为 0，脱空指数越大，表明脱空的可能性越大。

在脱空检测中，脱空与否的阈值是关键问题之一。在大多数情况下，难以给出阈值的理论计算方法，因此只能采用统计的方法确定。在本系统中，我们根据是否有健全部位的标定数据而采用不同的方法。

## 2.2 技术说明

在此，对手机声频法的标定、测试、流程、降噪等进行说明。

### 2.2.1 标定

假设健全部位（标定值）的脱空指数符合正态分布，其期望值（平均值）和标准偏差分别为  $\bar{S}$  和  $\sigma_S$ 。根据平均值  $\bar{S}$  和标准偏差  $\sigma_S$ ，可以得到各分项的脱空基准值  $C_k$ 。

### 2.2.2 测试

则对于某一测点  $i$  的测试数据  $x_{ik}$ ，可得到各脱空分项指数  $S_{ik}$ ，计算脱空指数  $S_i$ ：

根据  $S_i$ ，即可判定脱空（缺陷）与否：

$S_i \geq 1 + 0.682\eta$ ：缺陷

$1 + 0.682\eta > S_i \geq 1$ ：疑似缺陷

$1 > S_i$ ：健全

### 2.2.3 流程

- 1) 在标定模块中，针对健全位置，分别求出 3 个参数的均值和标准偏差；
- 2) 在测试模块中，输入上述标定得到的 3 个参数的均值、标准偏差和基准值。可根据情况，对标定数据进行调整；
- 3) 在测试过程中，根据 2 中的计算，得到缺陷、疑似缺陷、健全的判定；

## 2.2.4 降噪

在手机声频检测时，常常遇到有环境噪声的情况。此时，信号的抽出，以及降噪都成为非常必要。

降噪的方法有很多，如 STFT（短时域 FFT）降噪、WT（小波）降噪等。

### 1) STFT 降噪

STFT 降噪适用于环境噪声频谱比较一致的情形，如有风机运行等状况。

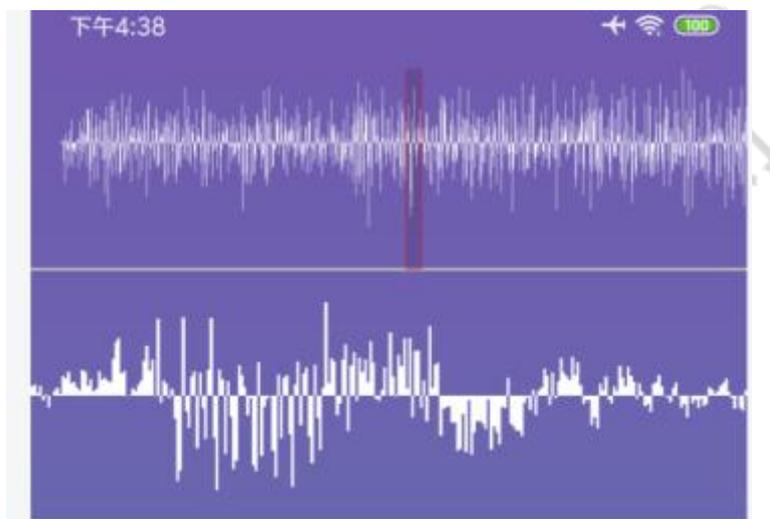


图 2-1-3 含风机噪声打声信号及抽出信号



图 2-1-4 环境噪声 FFT 及激发信号降噪后 FFT

### 2) WT 降噪

WT 降噪适用于环境噪声频谱比较杂乱、广域的情形，如车辆运行、人声等。

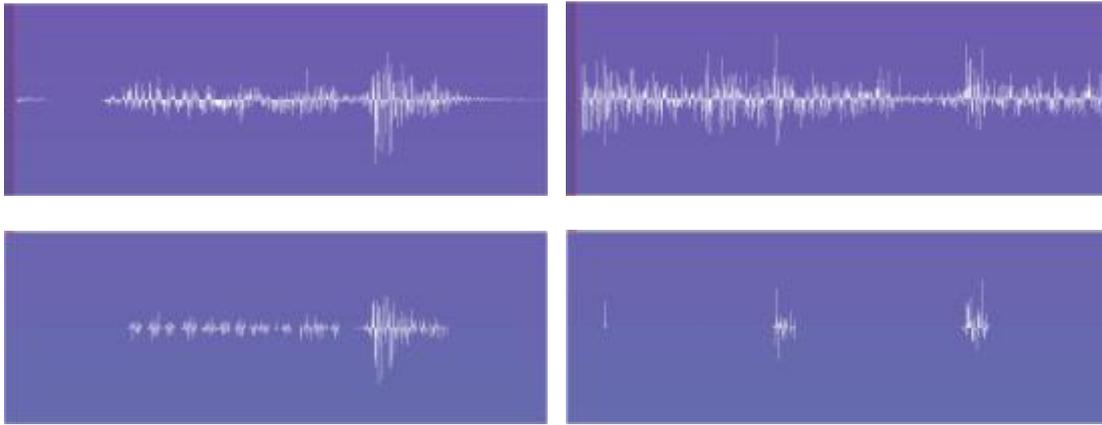


图 2-1-5 上：采集信号；下：WT 降噪后信号

### 2.2.5 大体积混凝土脱空阈值的自动判定

为了简化手机声频缺陷检测时的标定工作，更加客观、准确地进行声频检测，对于确定的激振锤，根据 Hertz 接触理论、锤的参数以及混凝土标号，计算出理论卓越频率  $f_c$  和变异系数  $\delta_c$ ，并根据实测经验值加以修正后，得到判断阈值。

#### 1) 激振锤（含 TTL 触发）参数确定：

- (1)  $m_1$ ：激振球体的质量，声频激振锤为 0.5kg；
- (2)  $R_1$ ：激振球体先端的曲率半径，声频激振锤为 0.025m；

#### 2) 混凝土动弹性模量 $E_d$ 确定

- (1) 推荐方法：利用混凝土强度测试仪测试得到；
- (2) 在不具备测试混凝土模量时，可根据混凝土设计抗压强度（ $f_{cu}$ ，单位 MPa）估算，确定激振频率的基准值  $f_0$ ，收集在不同混凝土的健全部位的敲击法数据（卓越频率、重心频率），求出其均值  $\bar{f}_D$  和  $\bar{f}_W$ 。

#### 3) 根据实测的均值与理论频率的均值，得到修正系数。

$$\eta_D = \bar{f}_D / \bar{f}_0$$

$$\eta_w = \bar{f}_w / \bar{f}_0$$

4) 据此，可以得到各分项的脱空基准值  $C_k$ 。

对于 C40 的混凝土结构，在我们收集的千余条数据得到的脱空基准值为 2.77~2.90KHz。

下图是对郑万线某隧道进行的敲击法测试结果，可见，脱空位置与健全位置的结果是完全不同的。脱空处的脱空指数绝大部分在 2 以上，而健全处的脱空指数均在 1 附近。

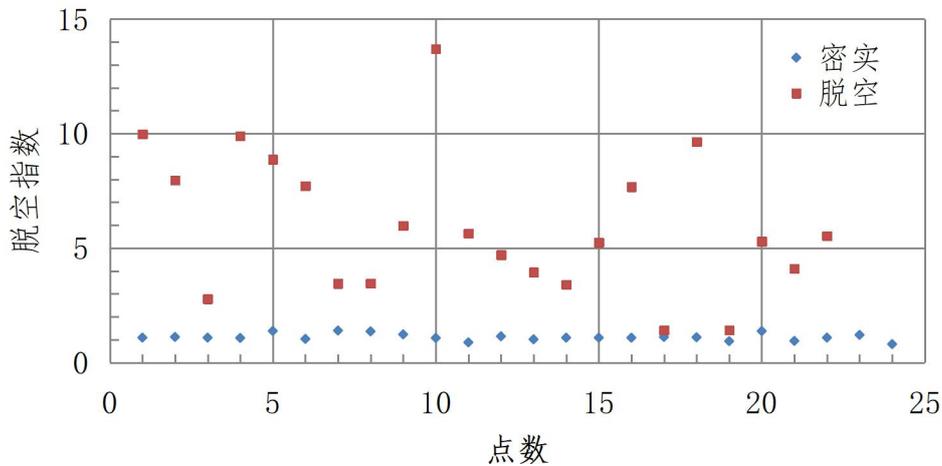


图 2- 1-6 手机声频隧道检测 脱空指数分析结果

## 2.3 模型试验

### 2.3.1 钢管混凝土模型

#### 1) 概述

检测对象为四川交通职业技术学院升拓共建基地内钢管脱空模型，模型上部为预设脱空缺陷（1、6、11、2、7、12），中部为渐变疑似缺陷位置（3、8、13）下部密实（4、9、14、5、10、15）。

采用手机声频及使用 21 传感器的混凝土多功能仪器对该模型进行了测试，测试方法采用振动法。测试时，同时使用两台不同型号手机进行信号采集。



图 2-3-1 钢管脱空模型

测区布置

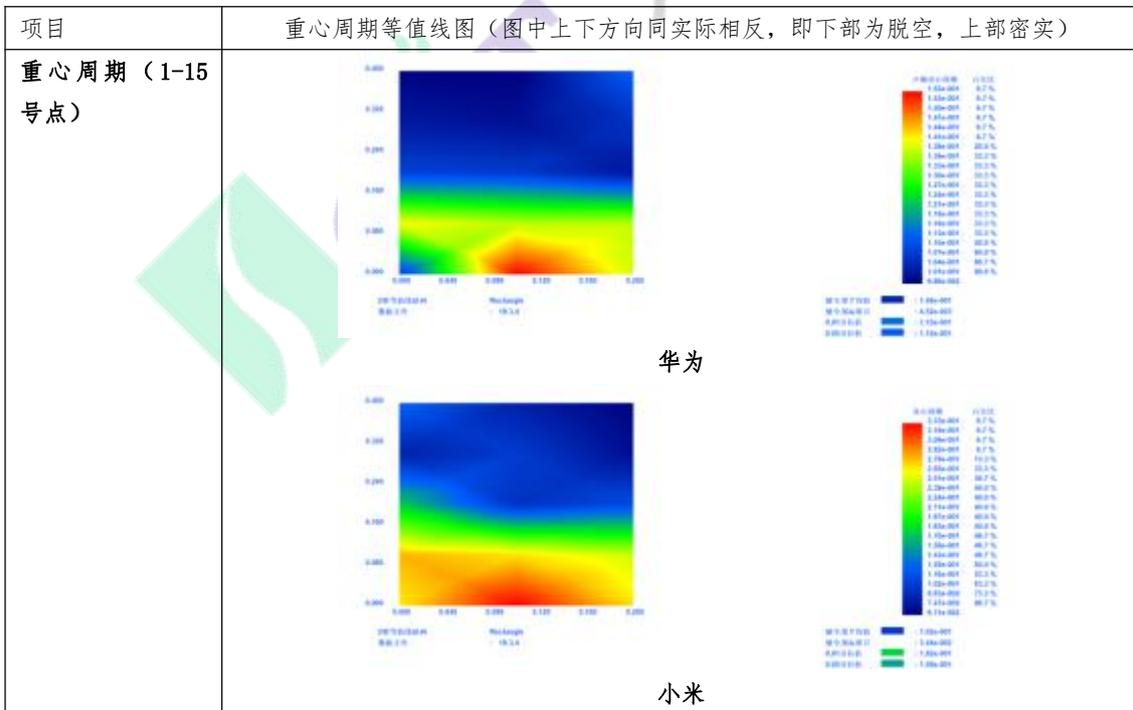
现场测试图

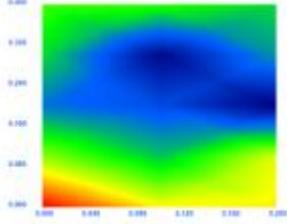
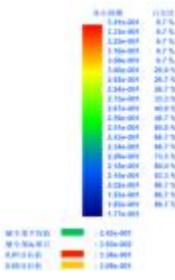
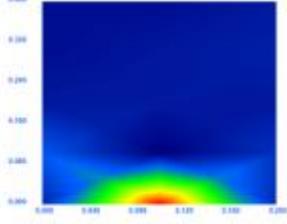
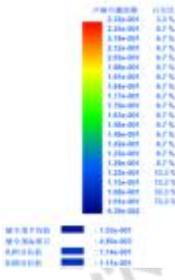
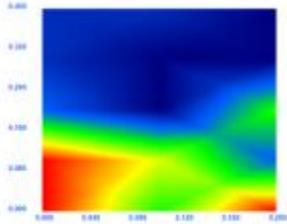
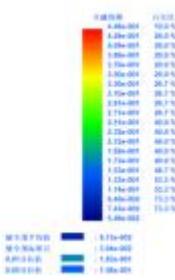
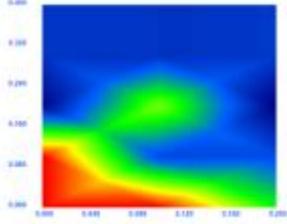
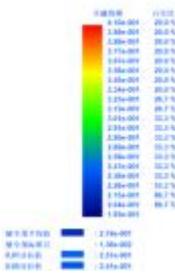
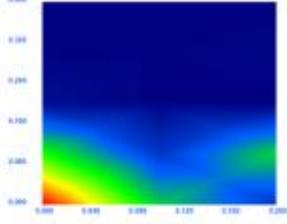
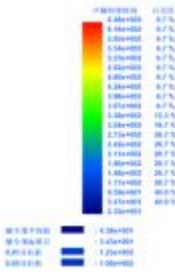
表 2-3-2 仪器型号

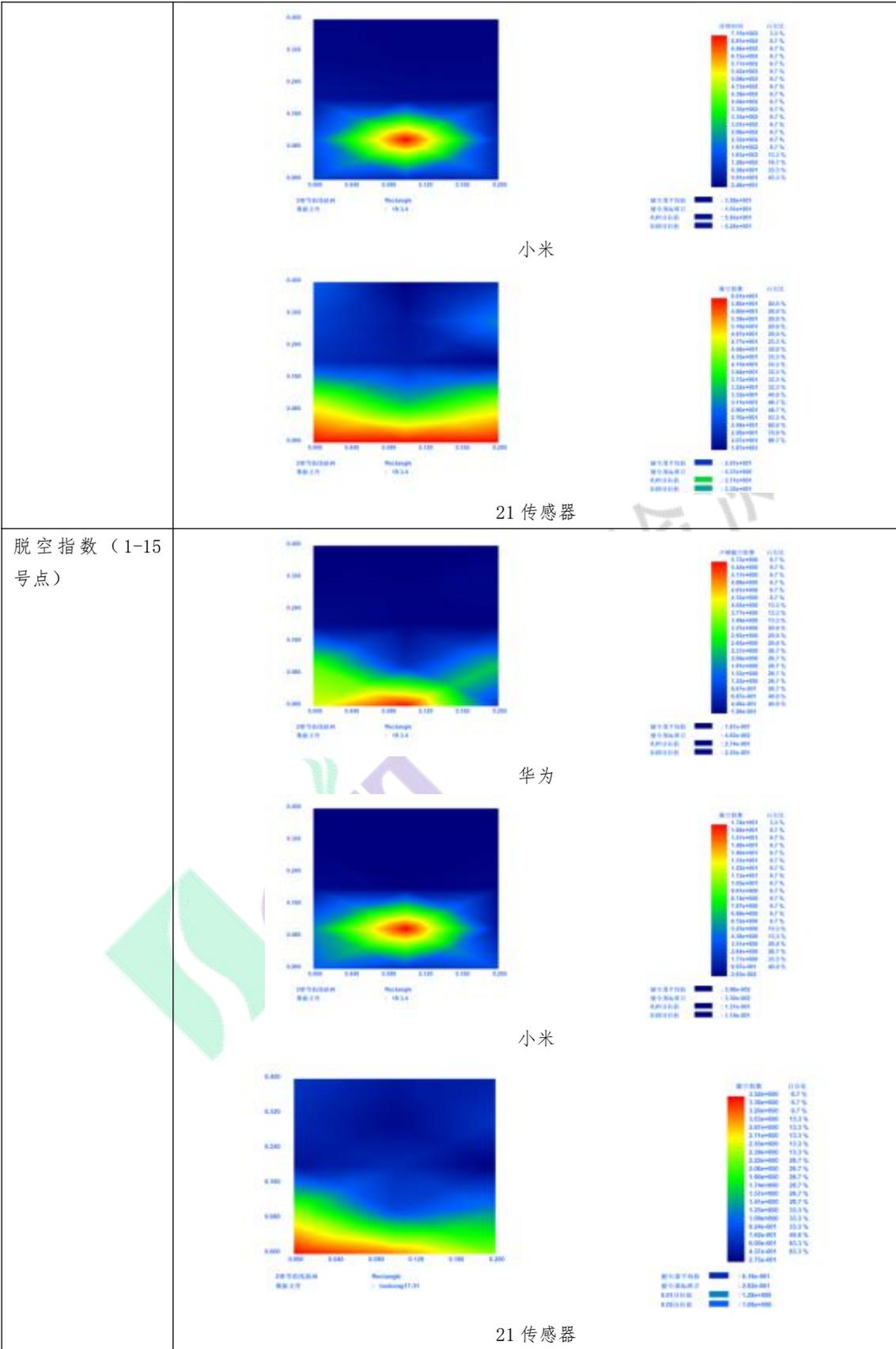
手机型号	华为麦芒 7	小米 4C
激振锤	D17	D30
混凝土多功能 (S)	21 传感器	

2) 测试结果对比

表 3-2-2 脱空数据对比



	  <p>卓越周期 (1-15号点)</p> <p>21 传感器</p>
<p>卓越周期 (1-15号点)</p>	  <p>华为</p>   <p>小米</p>   <p>21 传感器</p>
<p>持续时间 (1-15号点)</p>	  <p>华为</p>



### 3) 手机声频一致性对比（华为麦芒7）

敲击同一点，保持相同力度，多次测试，结果表明，手机声频测试整体较稳定。

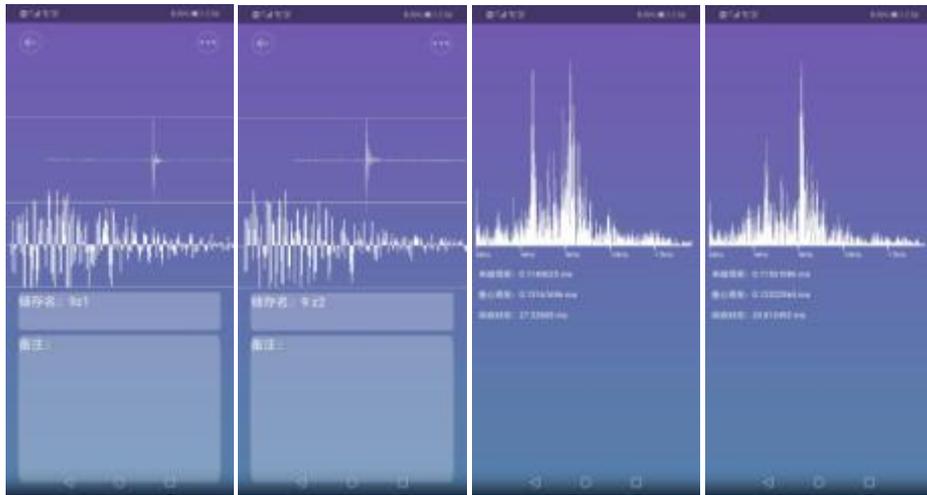


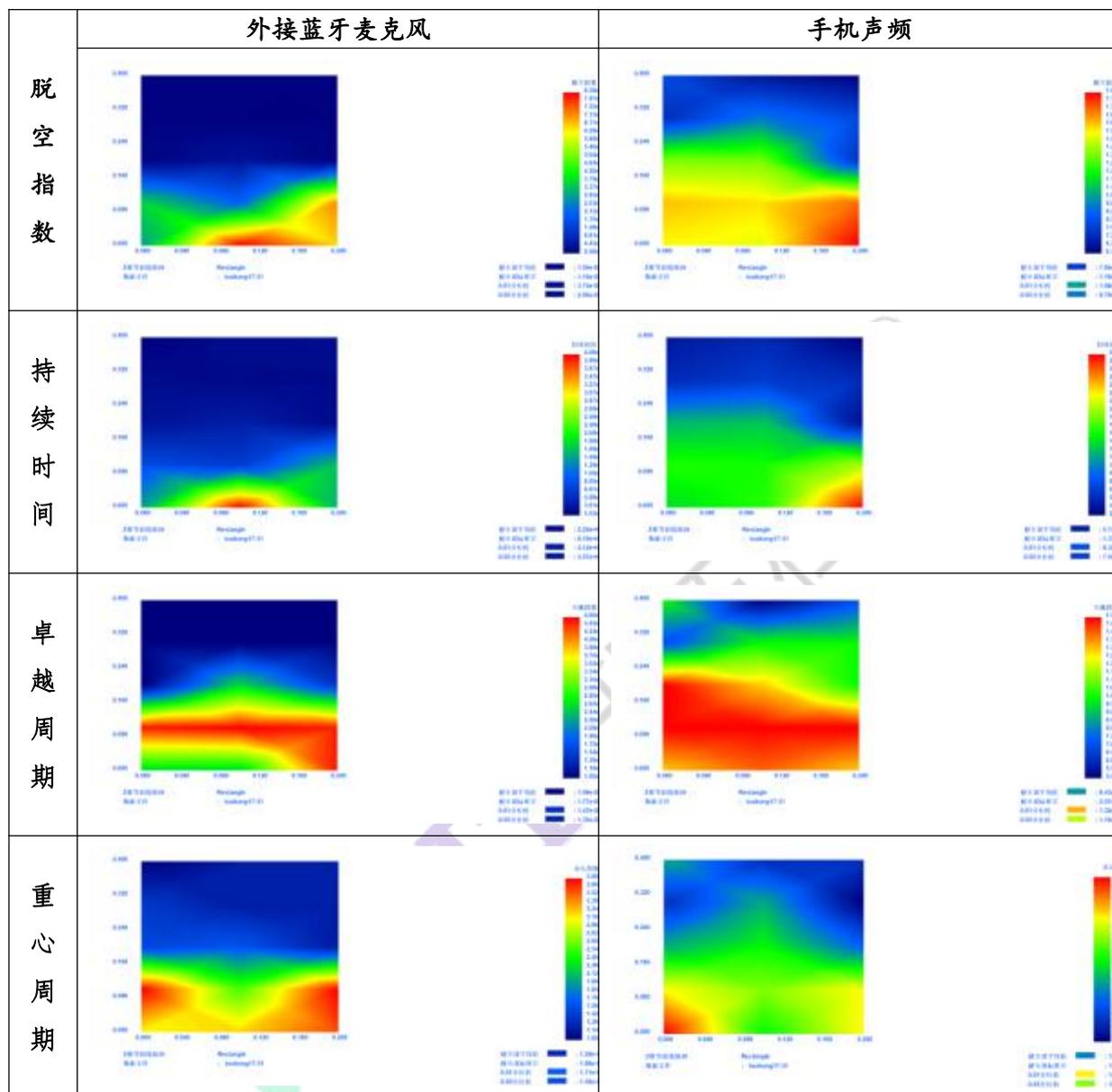
图 2-3-2 一致性对比（测试波形、分析结果）

## 2.3.2 钢管混凝土模型：外接麦克风对比（成都，2019.03）

### 1) 概述

检测对象仍为上述钢管混凝土，采用小米8 内置麦克风以及外接蓝牙麦克风的对比结果表明，外接蓝牙麦克风结果相较内置麦克风要更为稳定，灵敏度更高。

表 2-3-3 钢管脱空模型实测结果等值线图



### 2.3.3 隧道衬砌模型：一致性对比（成都、2019.04）

#### 1) 概述

检测对象隧道混凝土衬砌模型，并采用专用的激振装置激振。

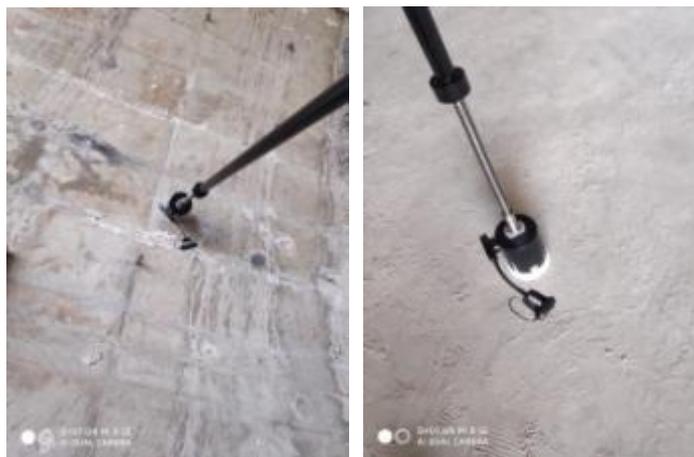


图 2-3-3 隧道衬砌检测（专用测试装置）

### 2) 手机自带麦克风同外接蓝牙麦克风信号采集一致性对比

选择隧道内轨道板中间一点作为测试点（混凝土密实），在该点使用手机声频及外接蓝牙麦克风分别采集 5 组信号，对比两种设备信号采集效果。

表 2-3-4 一致性对比数据（单位：ms）

测试次数	外置蓝牙			内置麦克风		
	卓越周期	重心周期	持续时间	卓越周期	重心周期	持续时间
1	0.26	0.26	9.04	8.52	0.19	59.65
2	0.56	0.25	9.88	0.12	0.4	29.96
3	0.25	0.2	9.32	8.52	0.16	84.89
4	0.22	0.25	7.09	8.52	0.48	63.28
5	0.26	0.23	8.2	8.52	1.1	89.32
均值	0.31	0.24	8.71	6.84	0.47	65.42
离散系数	0.45	0.10	0.12	0.55	0.81	0.36

可以看出：

- (1) 外接蓝牙麦克风所采集信号的更稳定，其离散系数远小于手机自带麦克风；
- (2) 外接麦克风同手机自带麦克风的数据之间差异较大，因此，在建立标定数据集及缺陷阈值设置中应将两者进行区分。

### 3) 敲击力度对手机声频采集信号的影响

在隧道仰拱中固定一点进行敲击采集信号，通过改变敲击力度来测试研究敲击力度不同对于手机声频信号采集的影响程度。

结果表明，不同敲击力度对于手机声频信号的还是有一定的影响，特别是在敲击力度较重时，测试得到的卓越周期的变化较大。

表 2-3-5 敲击力度的影响（外接麦克风，单位：ms）

测试次数	力度重			力度轻		
	卓越周期	重心周期	持续时间	卓越周期	重心周期	持续时间
1	1.5	0.25	40.55	2.56	0.9	38.88
2	0.98	0.83	37.95	0.77	0.54	34.46
3	2.32	0.36	37.53	0.41	0.45	31.02
4	0.12	0.31	42.35	0.43	0.64	30.67
5	6.39	0.34	33.02	1.6	0.64	35.49
均值	2.26	0.42	38.28	1.15	0.63	34.10
离散系数	1.08	0.56	0.09	0.80	0.27	0.10

### 2.3.4 地坪脱空检测（成都，2019.07）

针对道路铺装，采用人工激振的方法，在无噪声条件下采用双参数测试了脱空。

在方格地砖（如下图所示）上划出 20（5\*4）格地砖进行测试，人耳判断得出测试部分的第 4、5 列（测点编号 4、5、9、10、14、15、19、20）地砖有脱空。

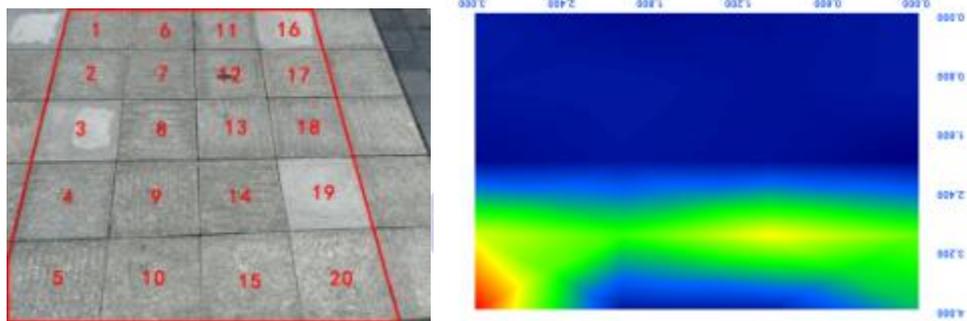


图 2-3-6 隧道衬砌检测（专用测试装置）

测试结果表明

- (1) 总体表现理想，在敲击力度相差不大的情况下可以精准地判断脱空；
- (2) 如果敲击力度过重或者过重都会严重影响其中心周期和卓越周期；

### 2.3.5 钢管混凝土模型：激振锤及敲击力度验证（成都，2019.07）

#### 1) 概述

检测对象仍为上述钢管混凝土，对比了激振锤（D30 和 D50），敲击力度等因素，并计算了脱空指数。

#### 2) D30 测试结果

- (1) 缺陷测点处数值（卓越周期、重心周期）与健全处无明显差别；

- (2) 部分缺陷位置的 FFT 频谱上出现低频峰值，但重复性不好；
- (3) 敲击力度对持续时间影响不大。



图 2-3-7 测点 1 (缺陷) 数据 测点 4 (健全) 数据

### 3) D50 测试结果

- (1) 缺陷处数值和健全处数值差别明显；
- (2) 对敲击力度进行了有效的修正；
- (3) 测试结果（脱空指数）判基本符合模型空实分布；



图 2-3-7 测点 4 (健全) 测点 1 (缺陷) (注意手机画面颜色变化)

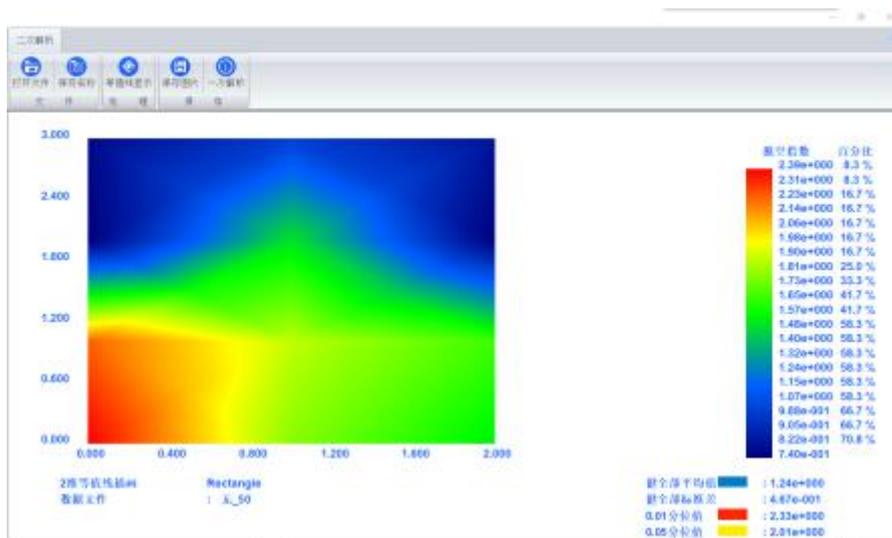


图 2-3-8 测试结果（脱空指数）分布图

#### 4) 小结

- (1) 对于钢管混凝土脱空，使用 D50 锤效果更好；
- (2) 力度修正功能虽然可以在一定程度上修正敲击力度，但不应过重或者过轻；
- (3) 在标定时应先敲击测点几次（不保存）以观察数据，在使用时如有异常数据应剔除。

### 2.3.6 隧道衬砌模型：缺陷检测验证（成都、2019.07）

#### 1) 概述

针对隧道混凝土衬砌模型，

- (1) 定点敲击，不断改变敲击力度来测试其稳定性。
- (2) 测试自动判定准确率测试：采集标定数据，通过标定数据集来对测试的数据进行自动判定测试。

#### 2) 稳定性测试结果

分别对一密实及缺陷点定点敲击，不断改变敲击力度来测试其稳定性，结果如下：

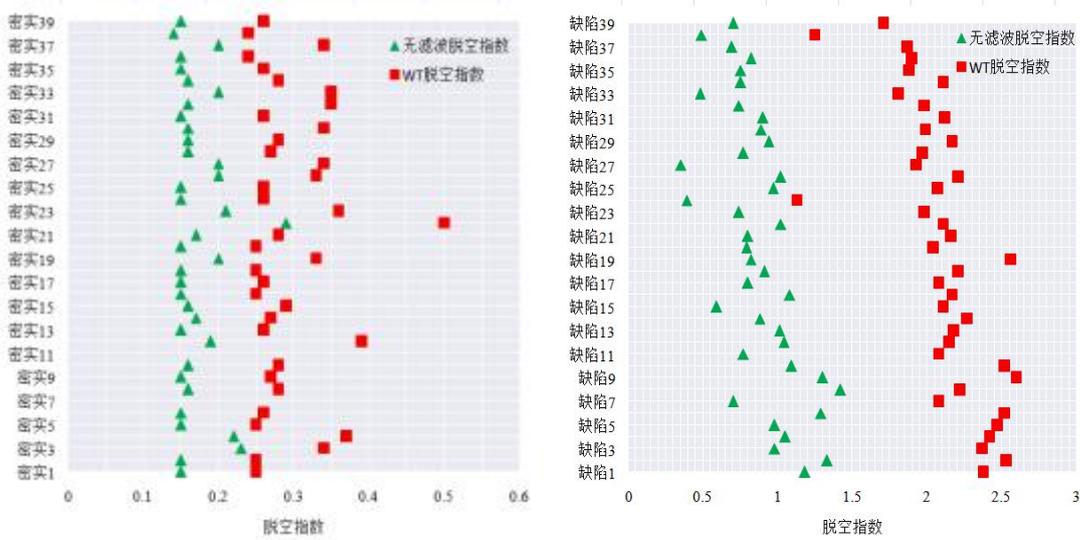


图 2-3-9 同一位置不同敲击力度得到的脱空指数（左：密实处，右：缺陷处）

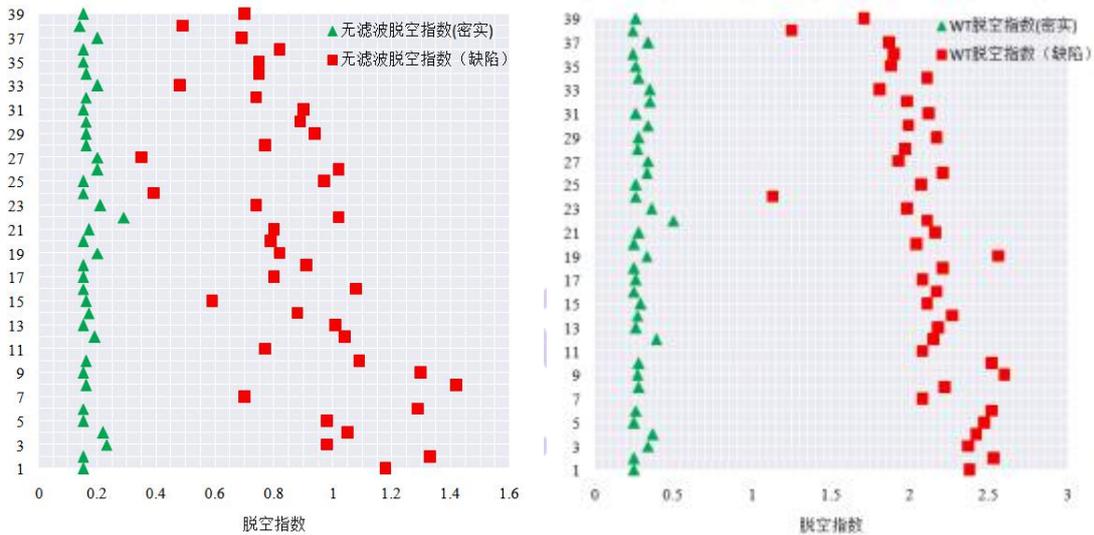


图 2-3-10 不同滤波方法得到的脱空指数（左：无滤波，右：WT 滤波）

### 3) 小结

- (1) 采用标定数据自动判定准确率：密实点为 97%，缺陷点为 95%，整体来看，KAS 的稳定性较好；
- (2) 在噪声较小时，无滤波模式与 WT 滤波模式均可适用。WT 滤波后，缺陷位置的脱空指数更为稳定；
- (3) 无滤波模式与 WT 滤波模式得到的脱空指数本身有较大差别，因此，标定与测试所选用的模式一定要对应。

### 2.3.7 混凝土缺陷模型：内、外置麦克风对比验证（成都、2019.11）

#### 1) 概述

利用手机自带麦克风同外接麦克风性能对比(定点敲击，不断改变信号接收距离)和板振脱空测试对比（接触式传感器、手机声频）

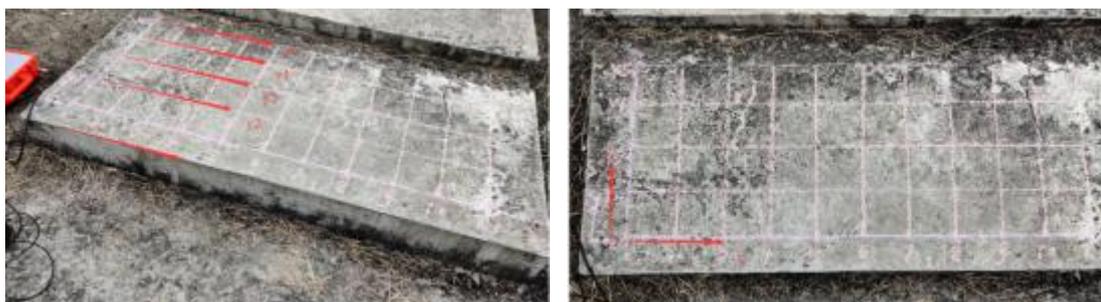


图 2-3-11 测试构件图、测线布置图

#### 2) 测试结果

##### (1) 信号稳定性对比

手机自带麦克风同外接麦克风在前期实验中，固定位置固定敲击点表现均较好，因此，此次在敲击过程中固定敲击点，不断改变信号接收点距离（0.2~1m）。

由下图可知，外接麦克风对于距离角度变换得适应性优于手机自带麦克风。

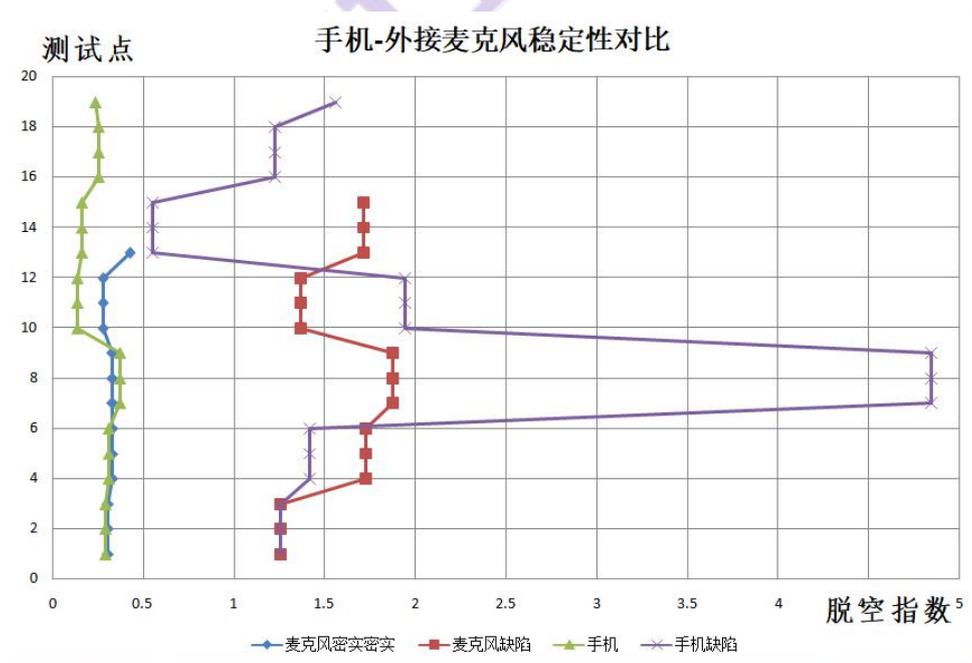


图 2-3-12 手机-外接麦克风对比结果图

## (2) 混凝土板脱空检测对比

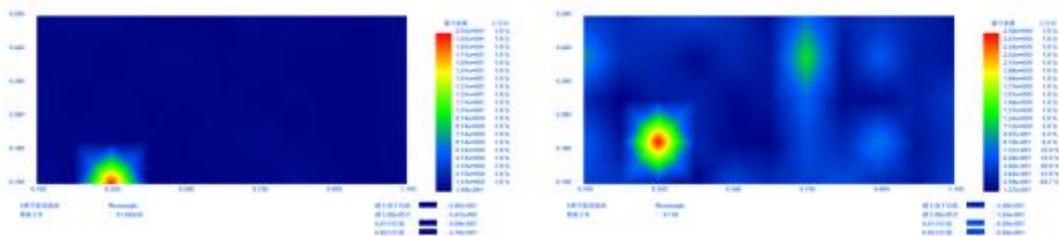


图 2-3-13 左：31 传感器测试结果 右：21 传感器测试结果

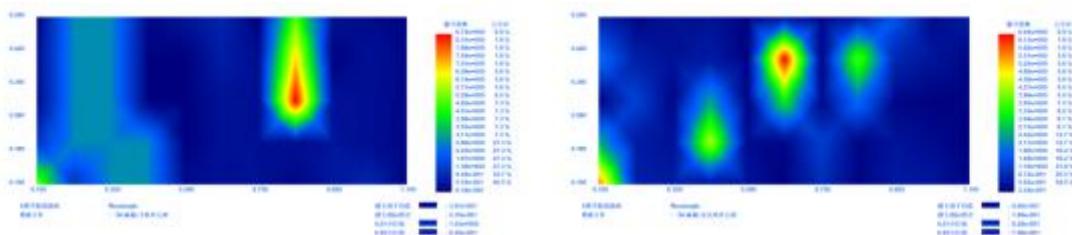


图 2-3-14 左：手机内置麦克风 右：手机外置麦克风

### 3) 结论:

- (1) 手机声频同外接麦克风测试结果差别小，一致性较好；
- (2) 手机声频对浅层脱空缺陷得检出能力优于接触式传感器。

## 2.3.8 混凝土底板缺陷检测（四川交通职业技术学院，2021.03）

### 1) 概述

为验证手机声频测试准确性及新激振控制器的使用效果，我们应用手机声频法及探地雷达法对四川交院模型隧道下方混凝土地面（有明显表层脱空现象）进行了测试对比。

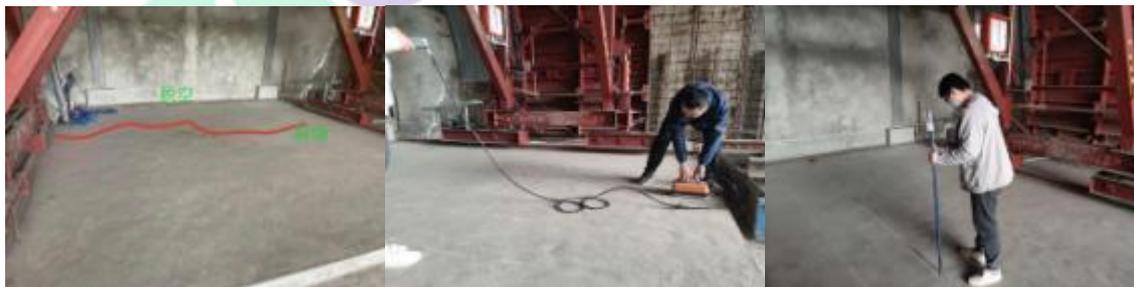


图 2-3-15 现场测试图

共布设 5 条测线，单条测线长均为 5m，间距 0.5m，敲击点间距 0.1m。



图 2-3-16 地质雷达及棒式激振装置

## 2) 试验结果结果分析

以测线 3 为例，雷达剖面图如下图左所示：测线 2 中 2m-4.3m 位置存在 8cm-4cm 渐变的浅层脱空缺陷，且 20cm 深度位置反射信号明显，应为空洞或软弱区。4.3-4.6m 位置为表层脱空缺陷。手机声频沿测线 3 脱空指数统计图如下图右所示，两种测试方法所得结果高度吻合。

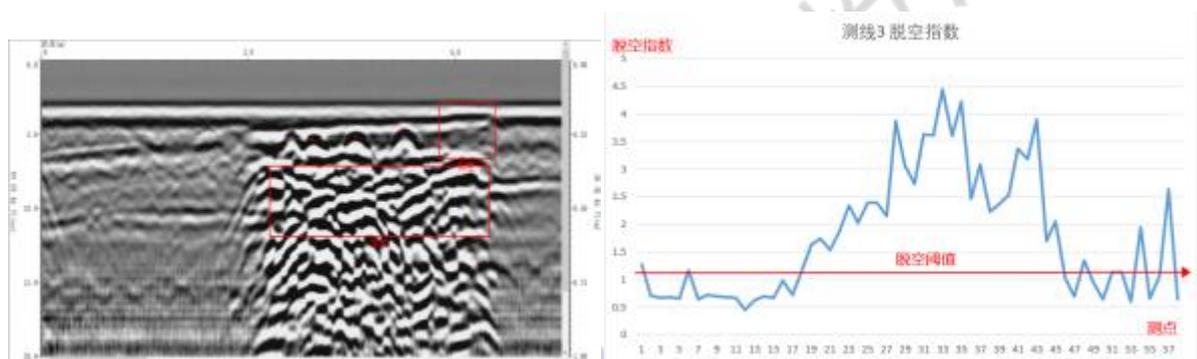


图 2-3-17 左：探地雷达测线 右：手机声频脱空指数

## 2.4 现场应用及验证

### 2.4.1 钢管结合面脱空检测（2020.06，郑州）

#### 1) 概述

2020 年 6 月，受中铁某院委托，对郑州某桥钢管与混凝土结合面质量进行了检测。



图 2-4-1 现场检测照片

### 2) 检测作业

由于本次检测缺少外接设备，外加拱桥下面为运营铁路，噪声较大，因此，本次手机声频检测受外界干扰因素影响较大。现场检测区域如图 2-1 所示。

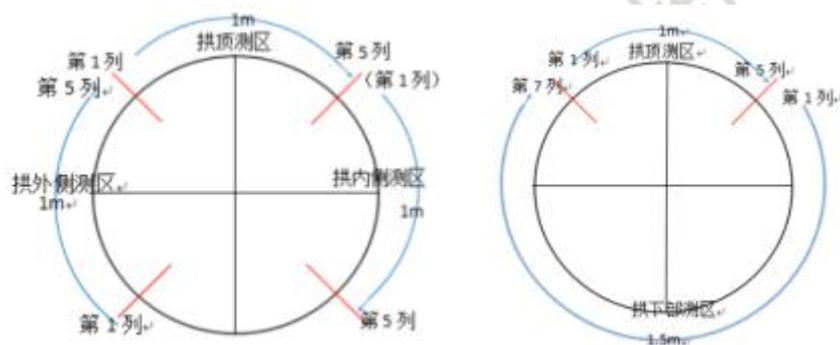


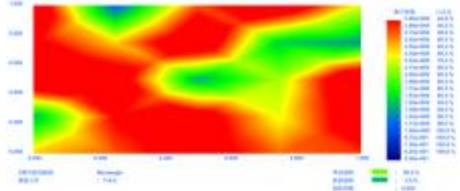
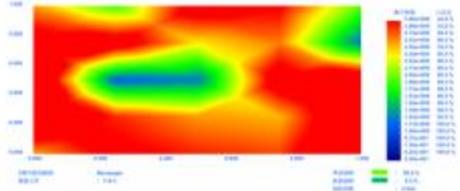
图 2-4-2 第 1、4 跨拱（左）；第 2、3 跨拱（右）测区布置示意图（拱断面）

### 3) 检测效果

本次手机声频检测过程中，分别对缺陷区域和健全区域进行了标定。当测试脱空明显的测区时，手机声频的测试结果与敲击法一致。但测试脱空不明显的测区时，手机声频与敲击法的测试结果相差较大。

表 2-4-1 手机声频与敲击法检测比较表

测区编号	手机声频检测结果图	敲击法
Y-4-1		在测区的右下方存在部分 密实区域

Y-4-2		整个测区基本为空响
Y-4-3		整个测区基本为空响

## 2.4.2 铁路隧道衬砌质量检测（2021.01，ZW 铁路）

### 1) 概述

我公司技术人员于 2021.1.22-23 日，随成都铁路局重庆工电段人员使用手机声频检测设备，对中铁某局 ZW 铁路某隧道进行仪器试用及数据采集。



图 2-4-2 现场测试图

### 2) 设备

表 2-4-2 设备一览表

手机型号	外接设备	敲击锤手锤/长柄锤、钢钎
------	------	--------------

小米 10 魅族	有线麦克风、蓝牙连采锤	
-------------	-------------	--

### 3) 手机声频现场测试情况

采用手机声频+蓝牙敲击手锤的组合共检测了两天，对于隧道二衬的浅层掉块、冷缝裂缝等缺陷均能有效检出，典型波形图如下：

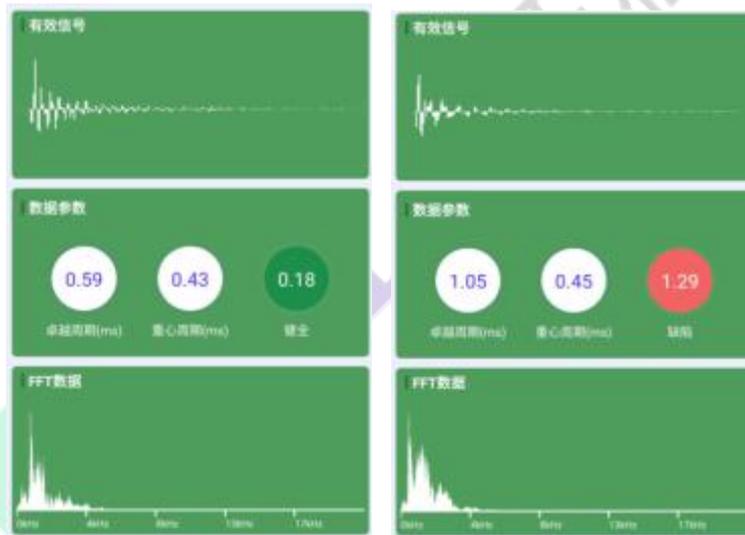


图 2-4-3 典型波形图（左：密实；右：缺陷）

### 4) 激振方式对比

对比检测结果表明，采用钢钎（实心螺纹钢，长 1.2-1.6m）激振的检测深度优于手锤。工电段技术人员通过钢钎敲击发现两个二衬空洞，并且验证成功（深度超过 30cm，空洞厚度约 20cm，面积 1~2 平米）。

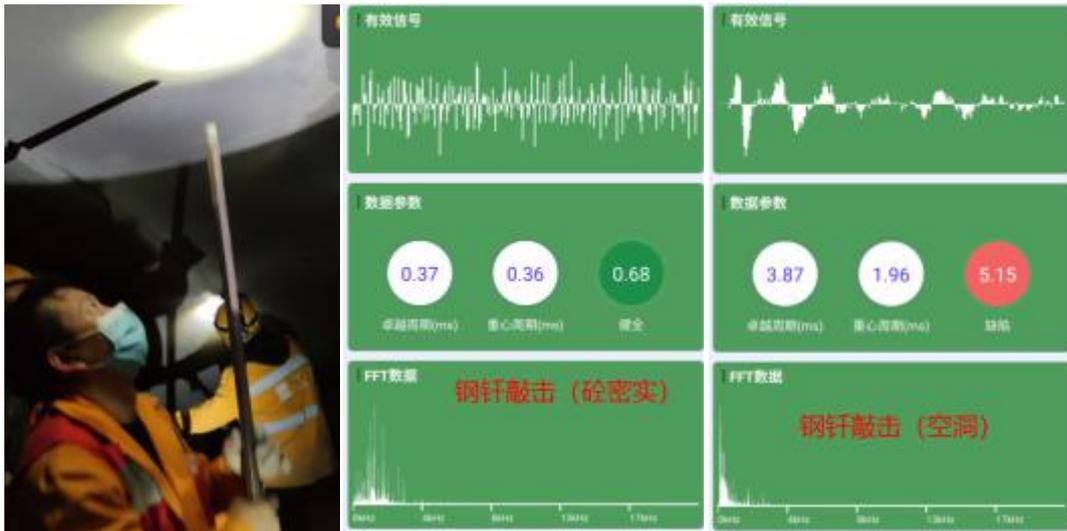


图 2-4-4 空洞（深度 30cm）数据

可见，密实位置的钢钎敲击信号声音较脆，振动频率单一，而空洞位置信号声音较闷，频率偏低，且波形图较完整位置信号区别明显。另一方面，手锤则无法有效检测较深缺陷。

### 2.4.3 铁路隧道衬砌质量检测（2021.04，CZY 铁路）

#### 1) 概述

我公司技术人员于 2021.4.23-25 日，使用手机声频检测设备，在 CZY 铁路 A 隧道、B 隧道和 C2 号隧道进行仪器试用，并与 IAE 法进行了对比。

其中 A 隧道采用的击振杆连采+软件分析的方式、B 隧道采用的软件连采+分析的方式，C2 号隧道使用手机自带录音软件录音手机数据。手机采用小米 10，激振采用标准钢钎加工击振杆（长 1.3m，先端曲率半径 0.04m）

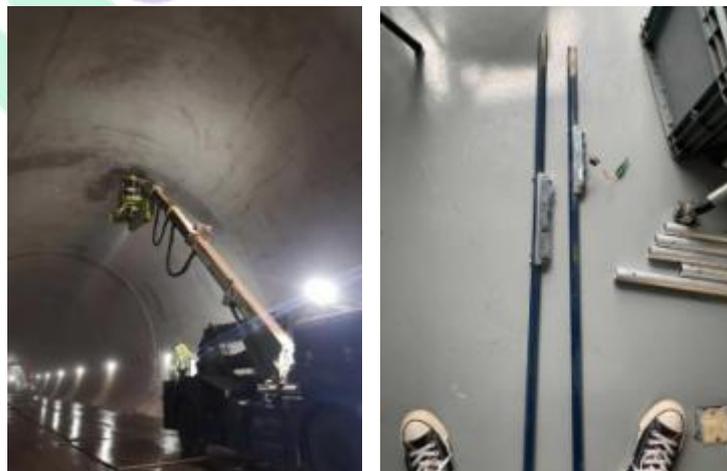


图 2-4-5 现场测试及激振装置

## 2) 测试结果

对于健全部位，测试得到的卓越周期均在 0.5ms 前后，与理论解完全一致。典型的健全、缺陷以及疑似缺陷的数据如下：



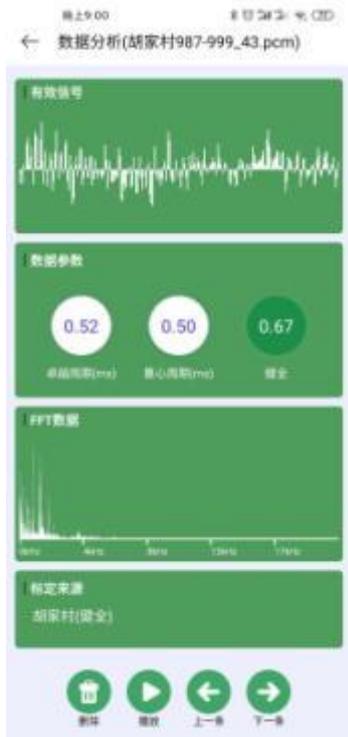


图 2-4-6 典型图形（左至右：健全、缺陷、疑似缺陷）

对检测出的缺陷部位进行了开孔验证，并得到了证实。

#### 2.4.4 铁路隧道衬砌质量检测（2021.05，ZW 铁路）

##### 1) 概述

我公司技术人员于 2021.5.26-27 日，随某工电段敲击检测班组应用手机声频检测设备，对中铁五局及十六局 ZW 铁路某段隧道进行敲击验收。测试采用钢钎式激振锤、小米 10 手机、有线麦克风和蓝牙连采锤。

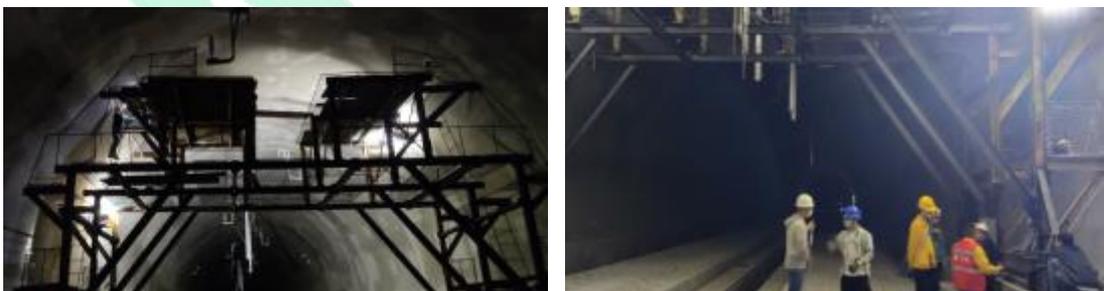


图 2-4-7 现场测试图

##### 2) 现场测试情况

协助工电段敲击班组检测出隧道二衬表层脱空掉块、施工缝脱空掉块缺陷共 9 处。



密实数据

表层脱空

施工缝位置脱空

图 2-4-8 典型波形图

3) 测试数据统计



图 2-4-9 ZW-某段隧道手机声频测试结果统计



图 2-4-10 ZW-某段手机声频测试结果统计

## 2.5 特点及提高精度的方法

### 2.5.1 特点

KAS 作为一种崭新的无损检测技术，具有以下特点：

- (1) 操作界面简单、便捷，仅拇指即可完成全部操作；
- (2) 数据实时解析，实时得出检测结果，并用不同颜色的画面显示；
- (3) 采用统计算法，测试精度的精度好、客观性高；
- (4) 多种降噪模式，可在环境噪声下检测作业；
- (5) 可修正敲击力度的影响，个人差小；
- (6) 支持等值线出图；
- (7) 便于记录、回溯，可再现敲击声响；
- (8) 测试深度范围在 10~20cm 以内。当采用特制激振棒时，测试深度可达 30cm 左右。

### 2.5.2 提高精度的方法

为了提高 KAS 的测试精度，需要注意：

- (1) 较大的激振锤一般效果更好；
- (2) 敲击力度的过大变化对测试有不利影响，应尽可能保障敲击力度均一；
- (3) 手机的朝向、与敲击点的距离对测试结果有少许影响；

- 
- (4) 标定数据的代表性、可靠性对测试结果影响很大，因此，在测试时激振锤、敲击力度、手机距敲击点的距离等尽可能与标定时一致；



---

## 第3章 裂缝检测

### 3.1 概述

利用手机的拍照功能和图像识别技术，可以简单地对混凝土结构的裂缝进行识别、勾勒，并对其宽度进行检测和统计。同时，通过外接传感器，基于相位反转法还可以对裂缝的深度进行检测，进而全面地获取裂缝信息。

#### 3.1.1 混凝土结构裂缝的危害

在实际工程中，钢筋混凝土结构的裂缝经常可见。裂缝的存在一方面影响了结构的美观和正常使用，另一方面削弱了结构的刚度和整体性，导致工程事故的发生。裂缝的危害主要体现在：

- (1) 钢筋混凝土结构物一旦产生裂缝，对本身会产生安全上及使用上的影响。外部环境的有害成分侵入，会使裂缝部分持续扩大及劣化，造成使用性能的降低，而导致使用寿命的缩短，甚至会影响结构物的安全性；
- (2) 对结构强度的影响：结构物裂缝发生后，其本身的刚性、剪力强度、拉力强度、抗弯强度都会降低，并可能导致结构行为发生应力重分配，造成进一步的破坏。裂缝严重时，还可能会使构件掉落而造成危害，如高速铁路隧道衬砌的掉块，对铁路行车的危害极大。
- (3) 对耐久性能的影响：裂缝对耐久性的影响，最主要的是加速混凝土中性化，使钢筋腐蚀速度变快，并因漏水、渗水，造成发霉、渗斑而使得保护层剥落，而缩短结构物的使用年限。
- (4) 对气密性能的影响：裂缝对于气密性能的破坏，主要是针对需要高气密性能的结构物而言的，如医院、核电厂，或一些疫苗培植性能的结构物。一旦发生裂缝，就会造成气密性降低，造成辐射线或疫苗菌类外泄，影响到人们的安全。

钢筋混凝土结构构件裂缝按其扩展性质，通常分三种：一是稳定裂缝，即裂缝的宽度、长度保持恒定不变；第二种是活动性裂缝，该裂缝的宽度和长度随着受荷状态和周围温度、湿度变化而变化；第三种是发展裂缝，裂缝的宽度和长度随着时间增长而增长。钢筋混凝土结构在各种荷载作用下，一般在受拉区允许在裂缝出现下工作，也就是说裂缝是不可避免的，只要裂缝是稳定的，其宽度不大，符合规范要求，并无多大危险，属安全构件。但裂缝随时间不断扩展，说明钢筋应力可能接近或达到流限，对承载力有严重的影响，危险性较大，应及时采取措施。裂缝稳定的结构，裂缝会不会再扩展，还要看所处环境是否稳定，环境变化，旧的裂缝可

---

能还会扩展，也还会出现新的裂缝，应结合具体条件加以分析。

### 3.1.2 混凝土结构裂缝的成因

钢筋混凝土结构物裂缝形成的因素有许多，如干缩、温度效应、外力超载或施工不当等都会产生裂缝。整体而言，可以分为结构性裂缝和非结构性裂缝。

#### 1) 结构性裂缝

结构物构件有一定的容许载重力。因此，超载势必会使得结构物产生额外的裂缝。设计错误将造成结构物严重龟裂，甚至发生重大事故。例如钢筋用量不足、不当配置等因素，均可能造成结构物龟裂；施工作业不当同样会导致混凝土龟裂，最常见的现象为，混凝土浇筑时添加水量，此时，不但增加干缩及沉陷裂缝发生的几率，更降低了混凝土原本的设计强度。养护时间不够、模板支撑力不足及施工缝设置不当都会使得混凝土产生裂缝。

结构性裂缝，根据受力性质和破坏形式进一步区分为两种：一种是脆性破坏，另一种是塑性破坏。脆性破坏的特点是事先没有明显的预兆而突然发生，一旦出现裂缝，对结构强度影响很大，是结构破坏的征兆，属于这类性质裂缝的有受压构件裂缝(包括中心受压、小偏心受压和大偏心受压的压区)、受弯构件的受压区裂缝、斜截面裂缝、冲切面裂缝，以及后张预应力构件端部局压裂缝等。脆性破坏裂缝是危险的，应予以足够重视，必须采取加固措施和其它安全措施。塑性破坏特点是事先有明显的变形和裂缝预兆，人们可以及时采取措施予以补救，危险性相对稍小。属于这类破坏的受力构件的裂缝有：受拉构件正载面裂缝，受弯构件和大偏心受压构件正载面受拉区裂缝等。此种裂缝是否影响结构的安全，应根据裂缝的位置、长度、深度以及发展情况而定。如果裂缝已趋于稳定，且最大裂缝未超过规定的容许值，则属于允许出现的裂缝，可不必加固。

钢筋混凝土结构构件的裂缝按其表征可分三种：一是表面细小裂缝，即缝宽很小，长度短而浅；二是中等裂缝，其宽度在 0.2mm 左右，长度局限在受拉区，裂缝已深入结构一定深度；三是贯穿性裂缝，缝宽超过 0.3mm，长度伸到受压区，裂缝已贯穿整个截面或部分截面。结构性裂缝不仅表征结构受力状况，还会影响结构的耐久性。裂缝宽度愈大，钢筋愈容易锈蚀，意味着钢筋和混凝土之间握裹力已完全破坏，使用寿命已近终结。一般室内结构，横向裂缝导致钢筋锈蚀的危险性较小，裂缝以不影响美观要求为度，而在潮湿环境中，裂缝会引起钢筋锈蚀，裂缝宽度应小于 0.2mm，但纵向缝易引起钢筋锈蚀，并导致保护层剥落，影响结构的耐久性，应予处理。当裂缝长度较长，深度较深，严重影响构件的整体性，往往是破坏征兆。例如受弯构件正截面梁底出现裂缝，裂缝长度向受压区发展，并到达或超过中和轴，是比较危险的，若缝长较短，局部在受拉区，一般危险性较小。裂缝深度也是表征之一，通常表面裂缝多是非结构性裂缝，贯穿性裂缝多是结构性裂缝，容易使钢筋锈蚀，危险性较大，应查明原因，根据危险性，采取必要的加固措施。

## 2) 非结构性裂缝

非结构性裂缝往往是自身应力（超过当时混凝土的抗拉强度）形成的，如温度裂缝、收缩裂缝，通常对结构承载力的影响不大，但对结构的耐久性、抗渗性有影响，并可能造成次生灾害（如隧道衬砌掉块等），因此也应引起重视。

### (1) 塑性收缩裂缝

混凝土由水泥、细骨材、粗骨材及水拌合而成，由于水与水泥的水化产生胶结作用，将粗细骨材连成一体，从而产生混凝土的强度。混凝土浇置后在凝固前呈现软性或塑性状态。拌合水化作用开始，混凝土表面曝露于大气间，混凝土表面的水分开始蒸发，并导致混凝土干缩。混凝土表面温度及风速均影响表面水分蒸发产生干缩的程度，因此混凝土内部与外表由于干缩差异，使混凝土的表面产生拉应变，如果此种干缩的差异发生在强度尚未完全形成时，混凝土将由于塑性收缩所造成的应变而产生破裂。

### (2) 塑性沉陷裂缝

这种裂缝是钢筋混凝土结构早期裂缝之一，发生原因为混凝土在浇置、抹平后骨材会继续下沉，当骨材下沉受到局部阻碍时（如钢筋或其它埋设物），导致邻近对象产生孔隙或裂缝。

### (3) 干缩裂缝

干缩裂缝是因为混凝土体积干缩变化并且收缩受到外部约束的影响。假使混凝土收缩未受到限制，则裂缝不会产生。但当收缩发生且受限制时，混凝土内部会形成拉应力，当拉应力超过混凝土强度时，裂缝就产生了。

### (4) 温度裂缝

混凝土浇置后由于水化热的消散速度不同，使内部造成温差，此温差会导致不同的体积变化，而产生拉应力，当此拉应力超过混凝土抗拉度时，即会产生裂缝。

### (5) 沉陷裂缝

对某些结构物而言，不均匀支承与基础沉陷或沉陷超过容许范围，都容易使得结构物产生额外的弯曲与剪力裂缝，这种裂缝是设计时无法考虑和预计的。

### (6) 气候因素

气候因素造成混凝土龟裂的因素包括温湿度作用及冻融现象等。南方地区虽然冻融现象发生的几率不大，但在温湿度方面却有很大影响，因此必须加以重视。通常温湿度作用所呈现的裂缝型态为八字型裂缝，其原因可能为结构物受日照后混凝土膨胀的结果。

### (7) 钢筋腐蚀

钢筋腐蚀是一种电化学过程，此过程需要氧气、水份及具阴阳极反应等化学反应。钢筋腐

---

蚀时相伴产生的生成物体积比钢筋体积要大，甚至可高达 7 倍，因此钢筋锈蚀膨胀后会对混凝土产生推挤，使混凝土受到拉力。当腐蚀生成物累积至某种程度时，混凝土表面裂缝便无法避免。随着钢筋生锈渐多，钢筋与混凝土间的握裹力便逐渐消失，最后导致混凝土剥落。

(8) 碱质反应（碱性骨料反应）

混凝土内水泥碱性物与骨材中活性二氧化硅在足够湿气及温度的环境催化下将产生一种膨胀性化学反应，即称碱质反应。此反应将造成混凝土衍生膨胀应变，从而使结构物劣化。

(9) 氯离子含量过高

### 3.1.3 混凝土结构裂缝的容许值

目前，不同的标准（规范）对裂缝宽度的容许是不同的。

1) 《工业建筑可靠性鉴定标准》GB50144-2008

将混凝土裂缝分为 a、b、c、d 四级，其中 a、b 两级不必处理；c 级影响安全或影响正常使用，应采取措施；d 级危及安全或不能正常使用，必须处理。

受力主筋处横向和斜向裂缝宽度按表评定等级；因主筋锈蚀产生的沿主筋的裂缝宽度按以下要求评定其等级 a 和 b 级无裂缝，c 级裂缝宽度小于等于 2mm，d 级裂缝宽度大于 2mm。

2) 《危险房屋鉴定标准》JGJ125-2016

该标准中规定混凝土构件裂缝有下列现象之一者，应评定为危险点：

- (1) 梁、板产生超过  $L_0/150$  的挠度，且受拉区裂缝宽度大于 1mm；
- (2) 简支梁，连续梁跨中部位受拉区产生竖向裂缝，其一侧向上延伸达梁高的  $2/3$  以上，且缝宽大于 1mm，或在支座附近产生剪切斜裂缝，缝宽大于 0.4mm。
- (3) 梁、板受力主筋处产生横向水平裂缝和斜裂缝，缝宽大于 0.5mm，板产生宽度大于 1mm 的受拉裂缝；
- (4) 梁、板因主筋锈蚀，产生沿主筋方向的裂缝，缝宽大于 0.5mm，或构件混凝土严重缺损，或混凝土保护层厚度严重脱落、露筋；
- (5) 现浇板周边产生裂缝，或板底产生交叉裂缝；
- (6) 预应力梁、板产生竖向通长裂缝；或端部混凝土松散露筋，其长度达主筋直径的 100 倍以上；
- (7) 受压柱产生竖向裂缝，保护层脱落，主筋外露锈蚀；或一侧产生水平裂缝，缝宽大于 1mm，另一侧混凝土被压碎，主筋外露锈蚀；

- (8) 墙中间部位产生交叉裂缝，缝宽大于 0.4mm。
- (9) 钢筋混凝土中间产生斜裂缝；
- (10) 屋架产生大于  $L_0/200$  的挠度，且下弦产生横断裂缝，裂缝大于 1mm；
- (11) 悬挑构件受拉区的裂缝宽度大于 0.5mm。

3) 《混凝土结构设计规范》GB50010-2010

结构构件正截面的受力裂缝控制等级分为三级，等级划分及要求应符合下列规定：

- (1) 一级——严格要求不出现裂缝的构件，按荷载效应标准组合计算时，构件受拉边缘混凝土不应产生拉应力；
- (2) 二级——一般要求不出现裂缝的构件，按荷载效应标准组合计算时，构件受拉边缘混凝土拉应力不应大于混凝土抗拉强度的标准值；
- (3) 三级——允许出现裂缝的构件：对钢筋混凝土构件，按荷载准永久组合并考虑长期作用影响计算时，构件的最大裂缝宽度不应超过本规范表规定的最大裂缝宽度限值。对预应力混凝土构件，按荷载标准组合并考虑长期作用的影响计算时，构件的最大裂缝宽度不应超过本规范规定的最大裂缝宽度限值；对二 a 类环境的预应力混凝土构件，尚应按荷载准永久组合计算，且构件受拉边缘混凝土的拉应力不应大于混凝土的抗拉强度标准值。

**表 3-1-1 结构构件的裂缝控制等级及最大裂缝宽度限值（单位：mm）**

环境类别	钢筋混凝土结构		预应力混凝土结构	
	裂缝控制等级	裂缝宽度限值	裂缝控制等级	裂缝宽度限值
一	三级	0.30~0.40	三级	0.20
二 a		0.20	三级	0.10
二 b		0.20	二级	-
三		0.20	一级	-

4) 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG3362-2018)

**表 3-1-2 最大裂缝宽度限值（单位：mm）**

环境类别	钢筋混凝土、采用预应力螺纹钢筋的 B 类预应力构件	采用钢丝或钢绞线的预应力混凝土结构
I、II 类	0.20	0.10
III 类以上	0.10~0.20	-~0.10

### 3.2 混凝土裂缝识别及勾勒

利用手机的拍照功能和图像识别技术，可以简单地对混凝土结构的裂缝进行识别和勾勒。此外，还可以对多张拍照的裂缝图片进行拼接。

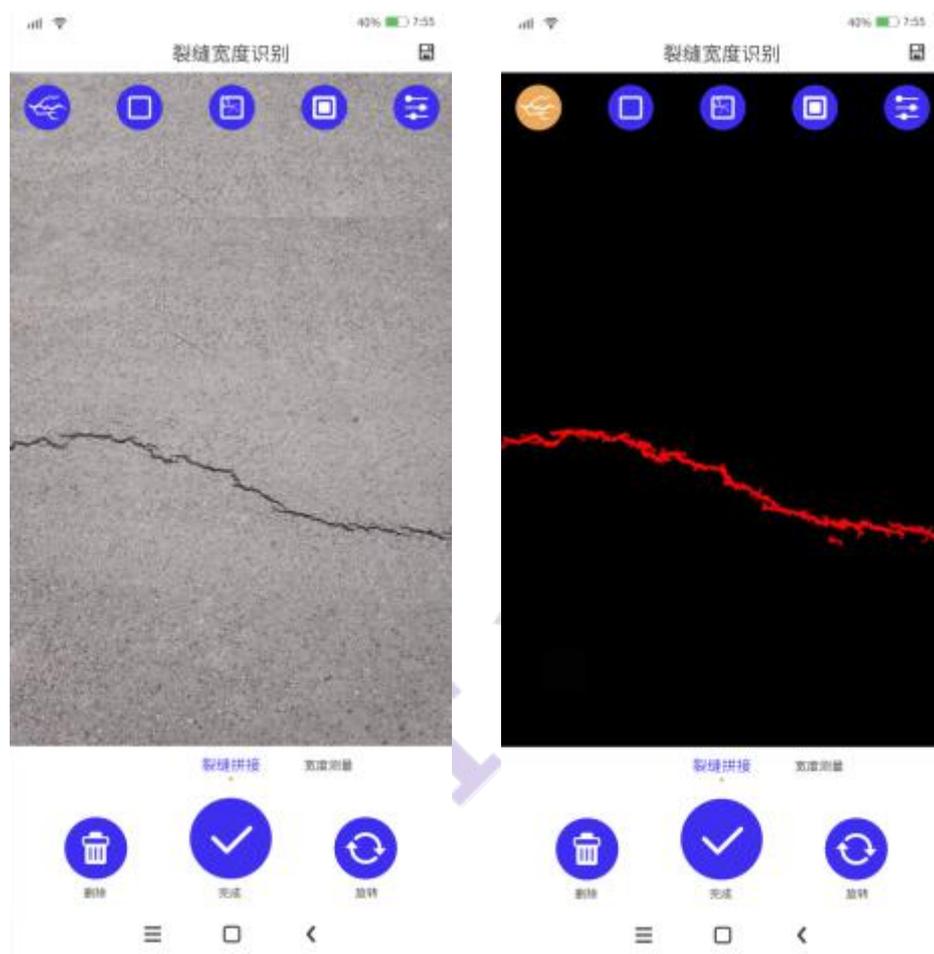


图 3-2-1 裂缝照片及裂缝识别和勾勒

### 3.3 混凝土裂缝宽度测试及统计

利用参照物，并通过图形变换，可以对裂缝的宽度进行检测和统计。

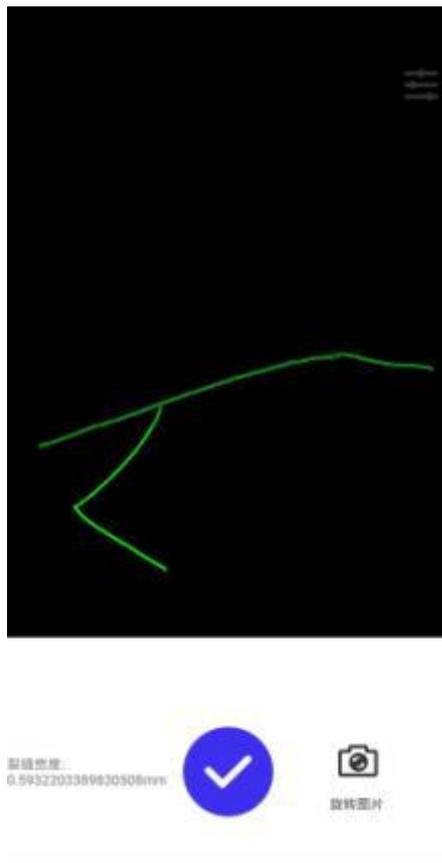


图 3-3-1 裂缝宽度测试

## 3.4 混凝土裂缝开口深度测试

### 3.4.1 混凝土结构裂缝开口深度测试原理

利用手机外置技术的传感器，基于激发的冲击弹性波绕过裂缝后的首波特征，采用相位反转法可以方便地测出裂缝的开口深度。

当激发的弹性波（包括声波、超声波）信号在混凝土内传播，穿过裂缝时，在裂缝端点处产生衍射，其衍射角与裂缝深度具有一定的几何关系。相位反转法正是基于该原理将激振点与接收点沿裂缝对称配置，从近到远逐步移动。当激振点与裂缝的距离与裂缝深度相近时，接收信号的初始相位会发生反转。

该方法只须移动冲击锤或换能器，确定首波相位反转临界点，就可确定混凝土的裂缝深度。与其它混凝土裂缝深度检测方法相比，具有无需通过公式计算，简单直观的特点。但需要注意的是，该方法能够测试为裂缝的开口部分，裂缝深度一般不超过 20cm。

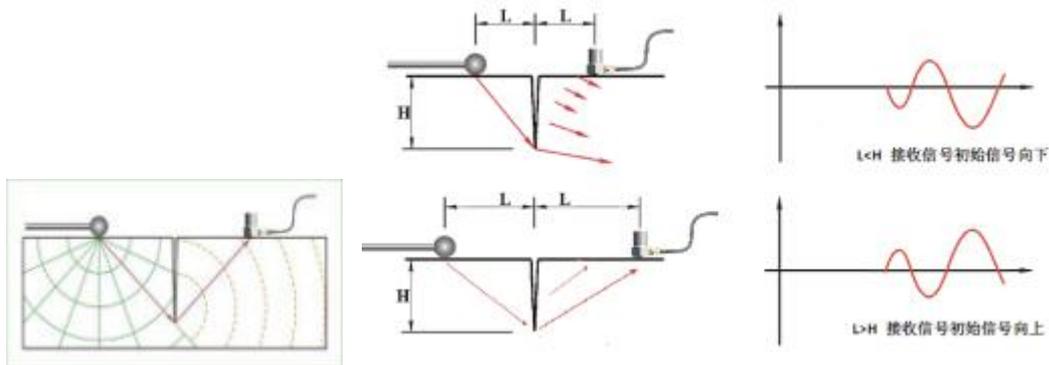


图 3-4-1 相位反转法的概念

### 3.4.2 混凝土结构裂缝开口深度测试例

对混凝土模型的裂缝深度进行了测试，得到的深度为 85mm，与设计值一致。

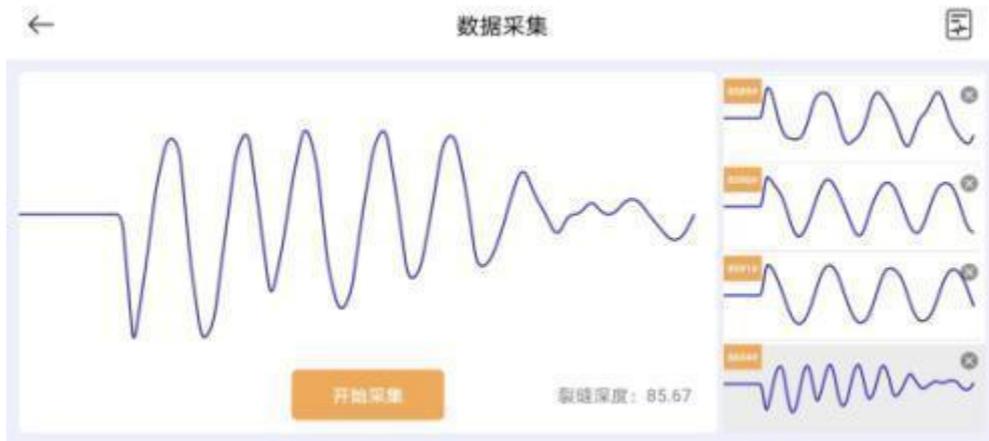
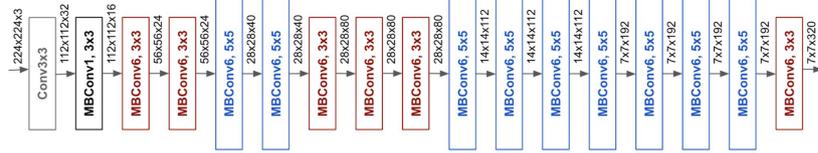


图 3-4-2 基于手机的裂缝深度测试例

## 3.5 基于 AI 的冷缝识别

### 3.5.1 基本原理

基于神经网络 (EfficientNet-Lite、ResNet50 和 MobileNet)，采用手机拍照可对冷缝的可能性进行初步研判。



EfficientNet-B0神经网络

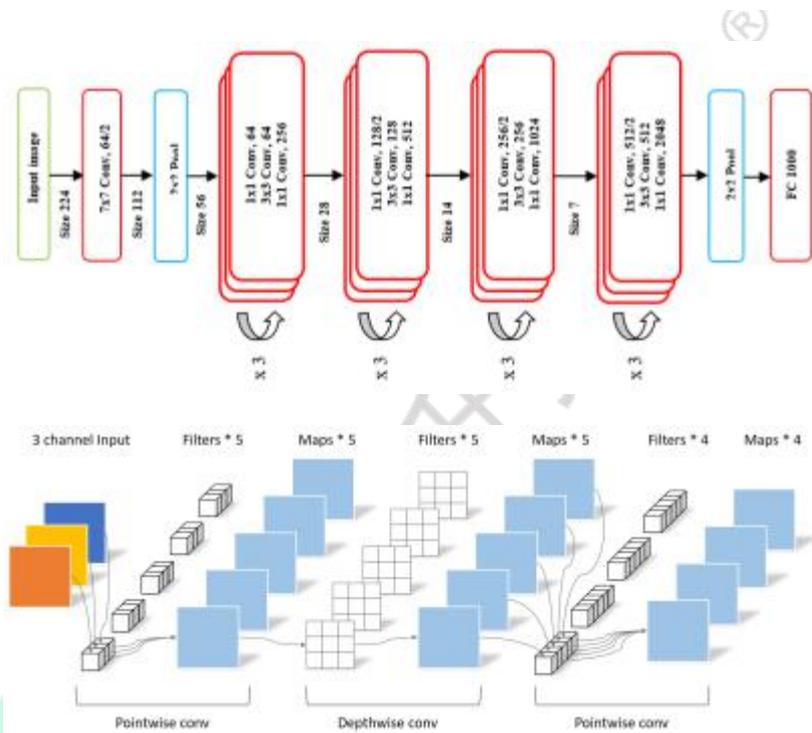


图 3-5-1 三种神经网络的原理(上至下: EfficientNet-Lite、ResNet50 和 MobileNet)

下图为对冷缝的部分标注和训练集, 其中 cs: 冷缝 (cold stitch); t\_cs: 轻微冷缝 (tiny cold stitch); n\_cs: 非冷缝 (none cold stitch)。

经过验证, 冷缝识别模型的训练精度为 0.94, 测试精度为 0.78。

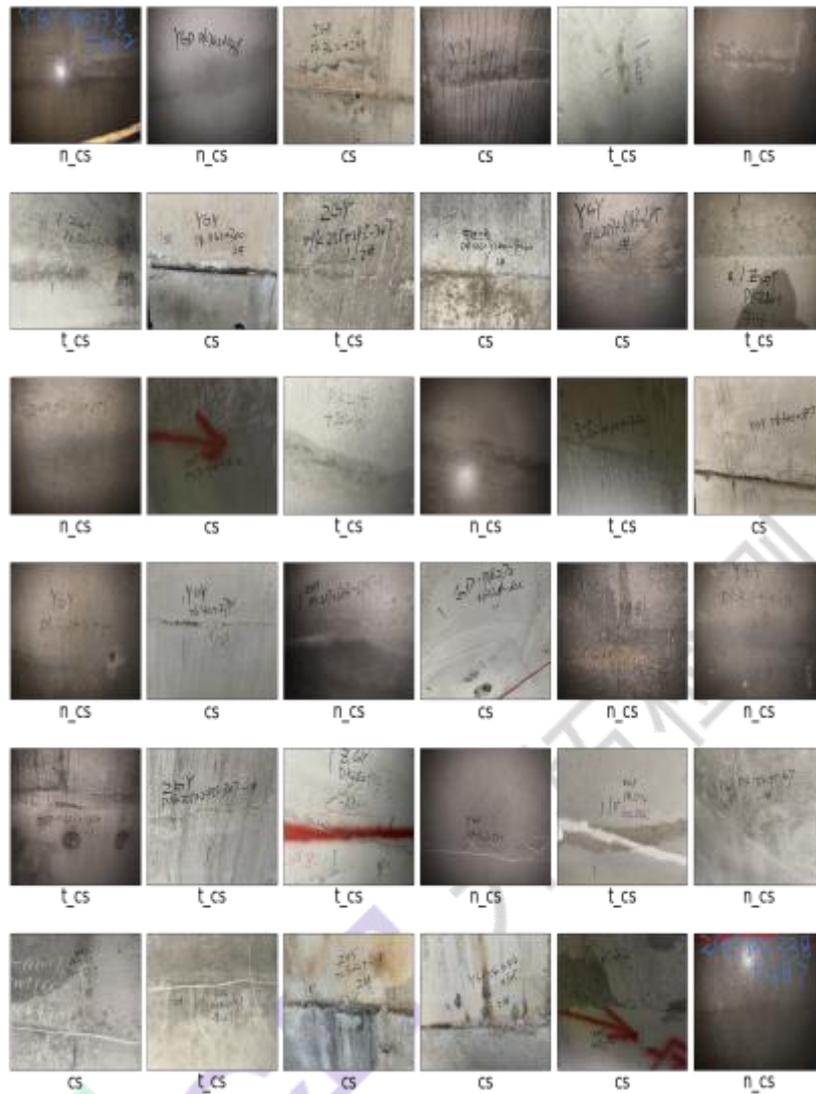


图 3-5-2 标注及训练集

### 3.5.2 冷缝识别 APP

根据训练的冷缝识别 AI 模型，开发了 APP，其典型截屏如下。APP 可以给出识别的置信区间。

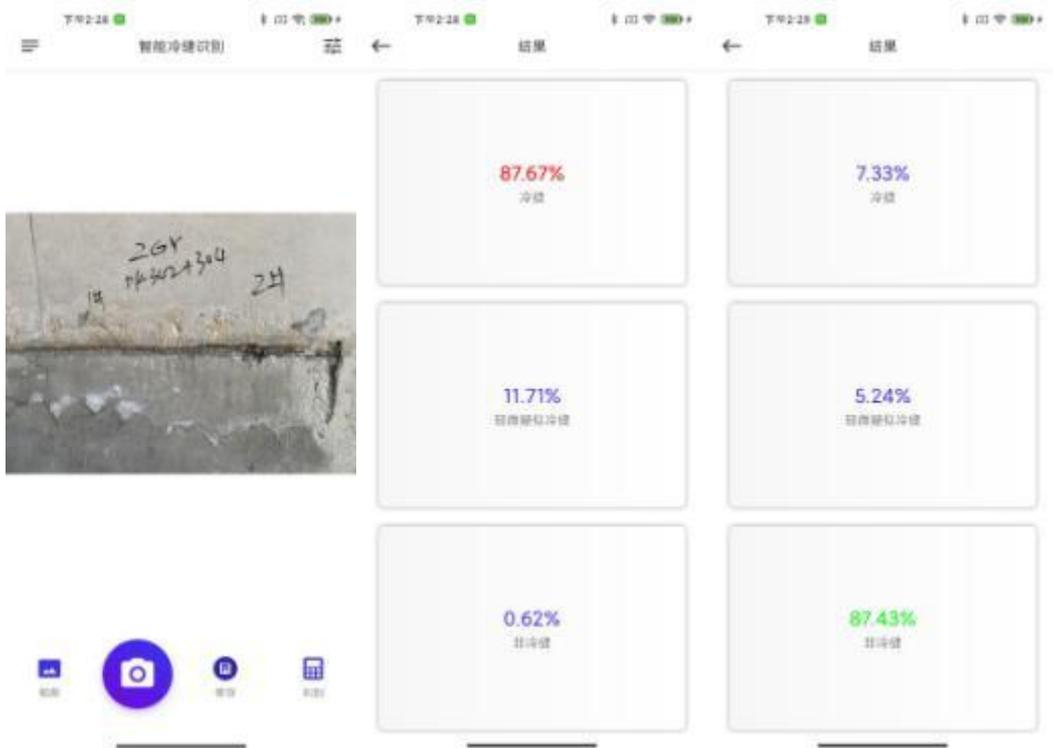


图 3-5-3 APP 及识别结果

NCIT 升学

## 第 4 章 紧固件检测机能

### 4.1 概述

我们还开发了基于智能手机的，针对紧固件的检测体系，具体包括：

- 1) 钢筋连接套筒的敲击法检测
- 2) 精轧螺纹钢的锚固质量检测
- 3) 精轧螺纹钢张力检测

### 4.2 钢筋连接套筒检测

#### 4.2.1 测试对象及内容

测试对象为钢筋连接套筒内钢筋的拧入深度。

钢筋贯入长度会影响套筒整体结构的振动特性，当敲击套筒时，其振动模态会随着打入其中钢筋长度而变化。

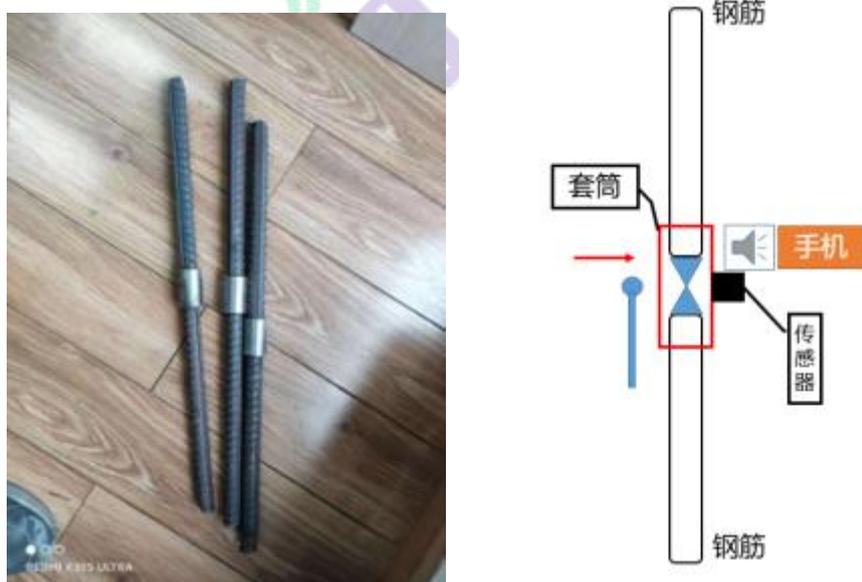


图 4-2-1 套筒连接件及测试概念

## 4.2.2 测试及分析结果

### 1) 手机声频 FFT 频谱图



图 4-2-2 FFT 结果图 (左: 紧密, 右: 松动 1 圈)

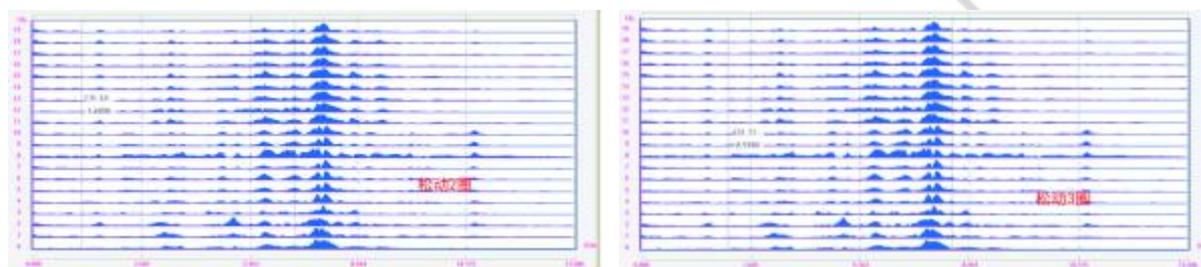


图 4-2-3 FFT 结果图 (左: 松动 2 圈, 右: 松动 3 圈)

由此可见, 套筒内钢筋连接紧密时, 套筒振动频率单一且集中, 当钢筋松动时, 频谱会变得复杂离散, 因此可以通过频谱分析对采用手机声频或传感器接收的套筒振动信号进行分析, 可有效区分套筒内钢筋是否连接紧密。

### 2) 手机声频频谱特征

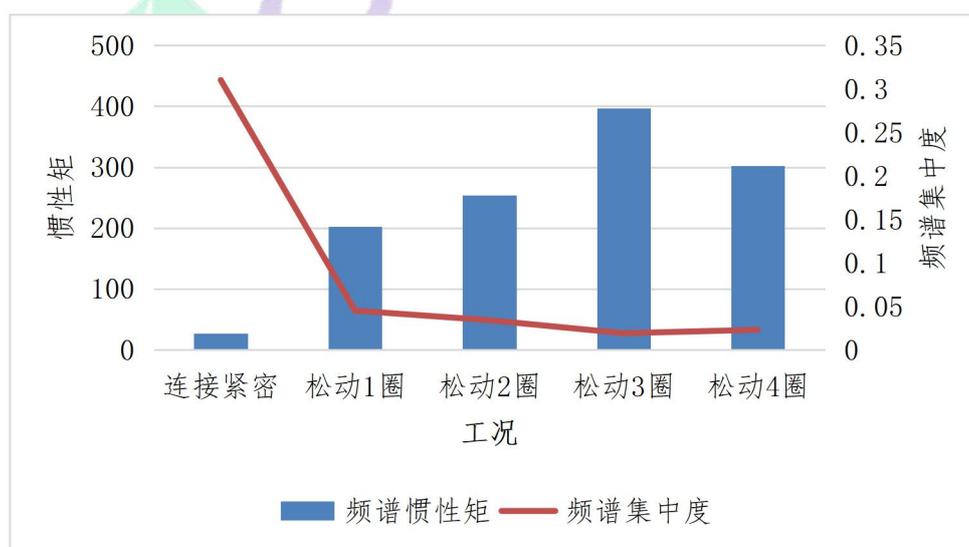


图 4-2-4 不同工况下手机声频数据特征统计图

可知，钢筋连接套筒内钢筋松动圈数越多，敲击产生的声音信号频谱惯性矩越大，频谱集中度越小，进而可对套筒内钢筋松动程度进行判别。

## 4.3 精轧螺纹钢锚固（灌浆）质量检测

### 4.3.1 测试对象及内容

测试对象为精轧螺纹钢的锚固质量，采用的是反射能量法。

### 4.3.2 数据采集及分析

采用外接传感器接收冲击弹性波信号，并根据底部反射信号的强弱来对锚固和灌浆质量进行判断。

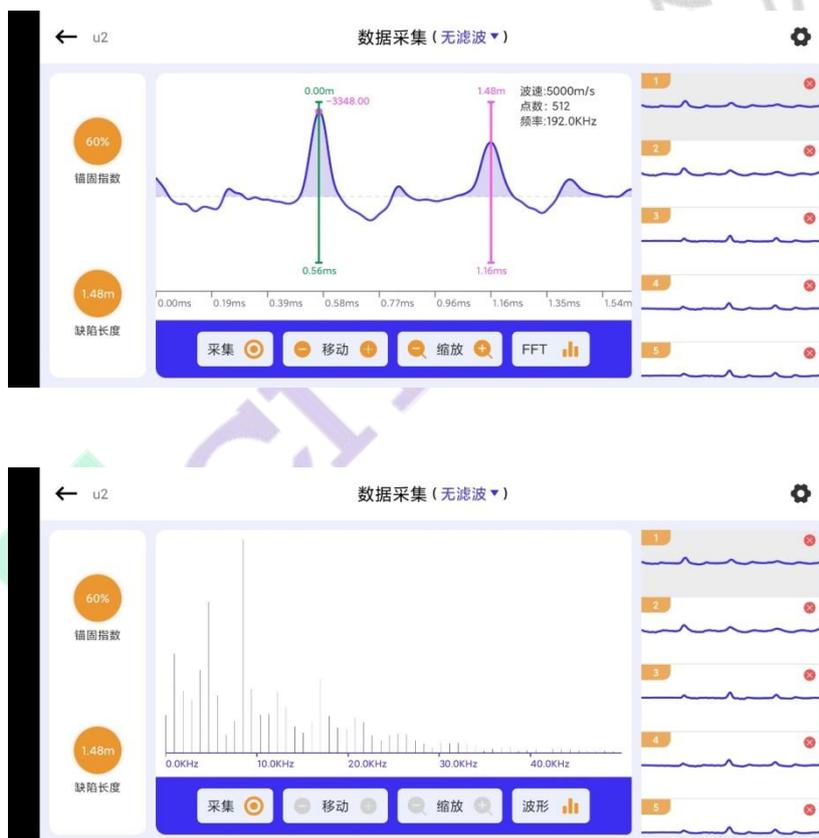


图 4-3-1 信号采集及分析界面



图 4-3-2 滤波及设定界面

## 第 5 章 IE 法结构厚度、缺陷检测

### 5.1 概述

利用智能手机+外接加速度传感器，可以测试混凝土结构的厚度、埋深等几何尺寸。

分析方法采用 IE 法，详细请参见：

- (1) SCIT-1-TEC-00-冲击弹性波检测技术基本原理
- (2) SCIT-1-TEC-02-混凝土材料及结构综合检测技术体系

### 5.2 试验验证

#### 5.2.1 混凝土梁厚度检测（四川交通职业技术学院，2021.03）

本次试验目的为测试手机 IE 法测试厚度和工控机 IE 法测试厚度的对比，测试改进后手机 IE 法的现场应用情况。使用 D17 激振锤。标定区域厚度为 0.3m，厚度 1 区域为 0.3m，厚度 2 区域为 0.25m。



图 5-2-1 现场试验照片

现场测试结果表明，手机平台测试厚度重复性好，基本达到实际应用水平；

表 5-2-1 混凝土结构厚度测试对比

测试项目		IPC（工控机）		SP（智能手机）	
		均值	标准偏差	均值	标准偏差
波速标定（km/s）		3.43	0.025	3.49	0.106
厚度测试 (m)	设计 0.3	0.29	0.006	0.30	0.005
	设计 0.3	0.27	0.008	0.30	0
	设计 0.25	0.23	0.001	0.29/0.24 <sup>注</sup>	0.052/

注：需剔除异常数据。

## 5.2.2 混凝土梁灌浆缺陷、厚度检测（贵州交通职业技术学院，2021.03）

### 1) 概况

在渐变梁及厚度分别为 60cm、25cm 的梁柱进行了手机 IE 法和工程机的对比测试。手机采用一加 7，激振采用 D17、D30 锤。

### 2) 内部缺陷试验结果

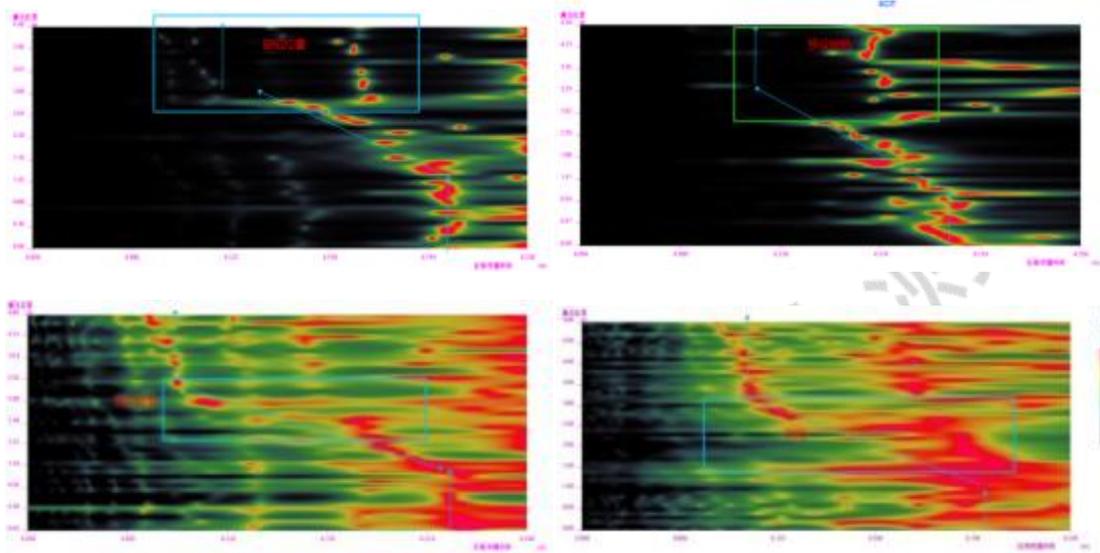


图 5-2-2 模型梁（存 40-20cm 渐变，预设缺陷）左：工程机，右：手机

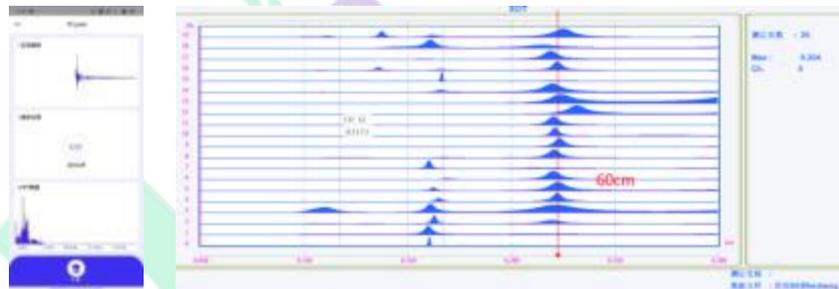


图 5-2-3: 手机模型梁板厚度测试（厚度 60cm）

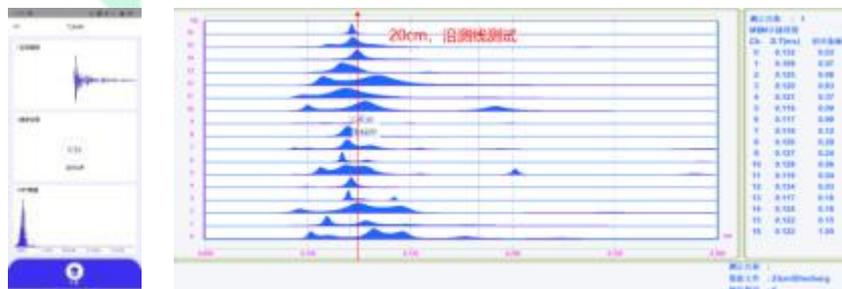


图 5-2-4: 手机模型梁板厚度测试（厚度 25cm）

### 3) 小结

虽然成像质量等距工程机略有差距，但达到了实用水平。

## 第 6 章 锚杆检测

### 6.1 概述

利用智能手机+外接加速度传感器，可以测试锚杆的长度、灌浆质量等。分析方法与工程机相同，详细请参见：

- (1) SCIT-1-TEC-05-2021-岩锚质量综合检测技术体系

### 6.2 试验验证

#### 6.2.1 锚杆模型检测（四川交通职业技术学院，2021.03）

基于智能手机锚杆长度开发试验需求，在四川交院老基地进行了锚杆试验测试。通过手机外接 ICP 传感器，专用耦合剂吸附的方式试验，D10 锤激振采集数据。



图 6-2-1 手机锚杆长度试验



图 6-2-2 测试波形示意图

实验结果表明：

- 
- (1) 测试信号中激振首波清晰，反射波明显，测试精度较高；
  - (2) 设备操作简便，适用性较好。



## 第 7 章 基桩小应变检测

### 7.1 概述

利用智能手机+外接加速度传感器，可以测试基桩的长度、断桩等缺陷。分析方法与工程机相同，详细请参见：

- (1) SCIT-1-TEC-10-2021-基桩质量检测技术体系

### 7.2 试验验证

#### 7.2.1 手机基桩低应变测试（贵州交通职业技术学院，2021.03）

##### 1) 概述

为验证手机基桩低应变设备的检测效果，我司技术人员于 2021. 3. 26 日在贵州交院无损检测实训基地基桩进行了测试。手机采用一加 7，激振锤采用升拓低应变激振锤。

##### 2) 试验结果

- (1) 案例 1：1 号桩（设计长度 6m，5m 位置桩底沉渣）

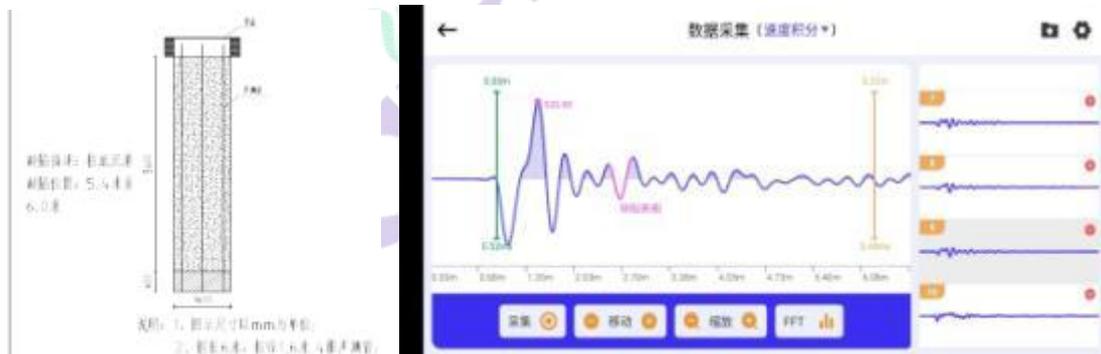


图 7-2-1 左：1#基桩模型设计图，右：检测波形

在采用波速 3.6km/s 时，5.32m 处存在桩底反射信号，3m 有缺陷反射信号。

- (2) 案例 2：3 号桩（设计长度 6m，2.8m 位置断桩缺陷）

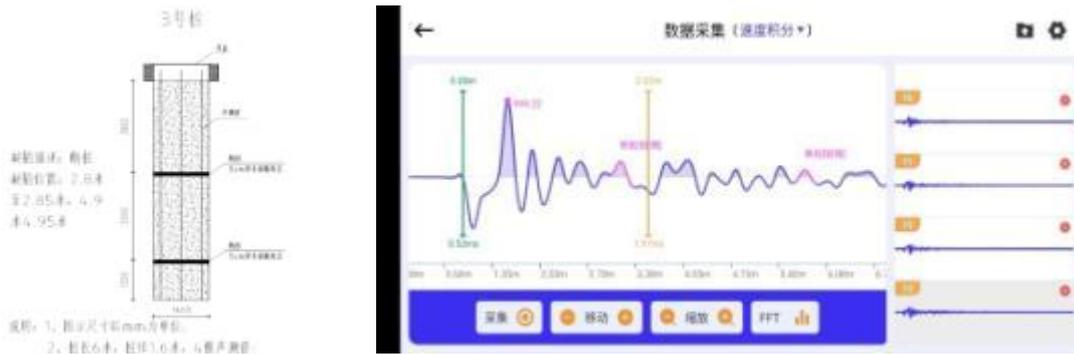


图 7-2-2 左：2#桩模型设计图，右：检测波形

检测结果表明，2.62m 处存在断桩反射信号。

(3) 案例 3：7 号桩（设计长度 6m，2m、4.5m 位置存在缺陷）

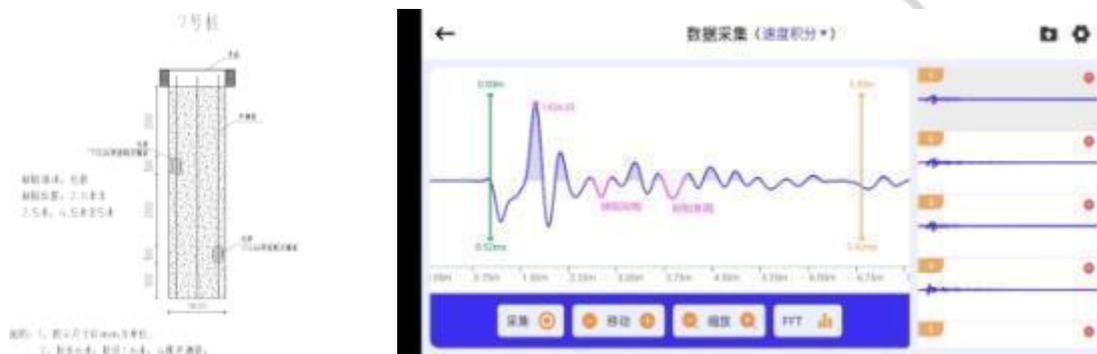


图 7-2-3 左：3#桩模型设计图，右：检测波形

3) 小结

验证结果表明，手机桩检测技术基本达到了实用化技术水平。

## 第 8 章 其它常用检测

### 8.1 基于 AI 的钢筋等棒状构件计数

基于 AI，开发了智能钢筋计数 App 后，可对钢筋等棒状构件自动计数，大大提高了工作效率和精度。

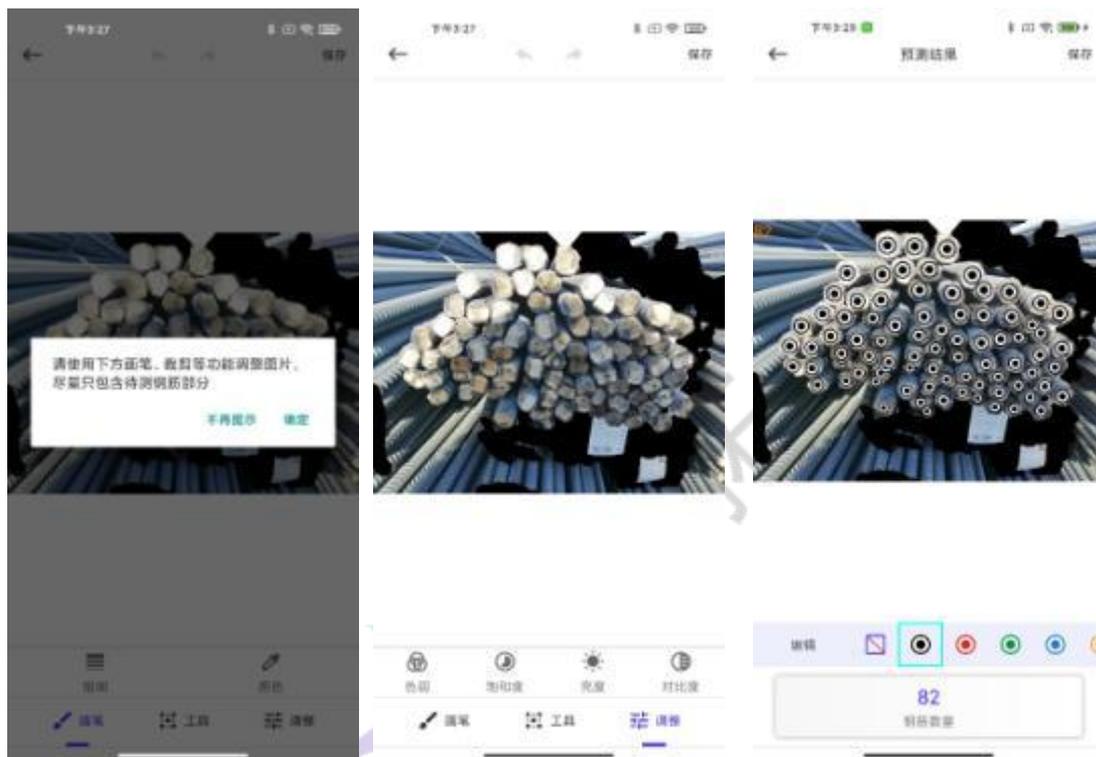


图 8-1-1 左：APP 启动，中：检测区域设定及裁剪，右：计数结果

### 8.2 钢筋直径及保护层厚度测试

基于智能手机，开发了钢筋直径及保护层厚度测试 APP 及系统。



图 8-2-1 左：A 设定，中：连接探头，右：测试结果

CTT 升邦

---

## 结语与致谢

基于智能手机的巡检技术具有快速、移动、多功能等特点，是我公司倾情打造的新一代结构无损巡检技术。

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！

中国国家铁路集团质量监督管理局

中铁十一局

四川路桥集团

贵州交通职业技术学院

成都铁路局集团有限公司

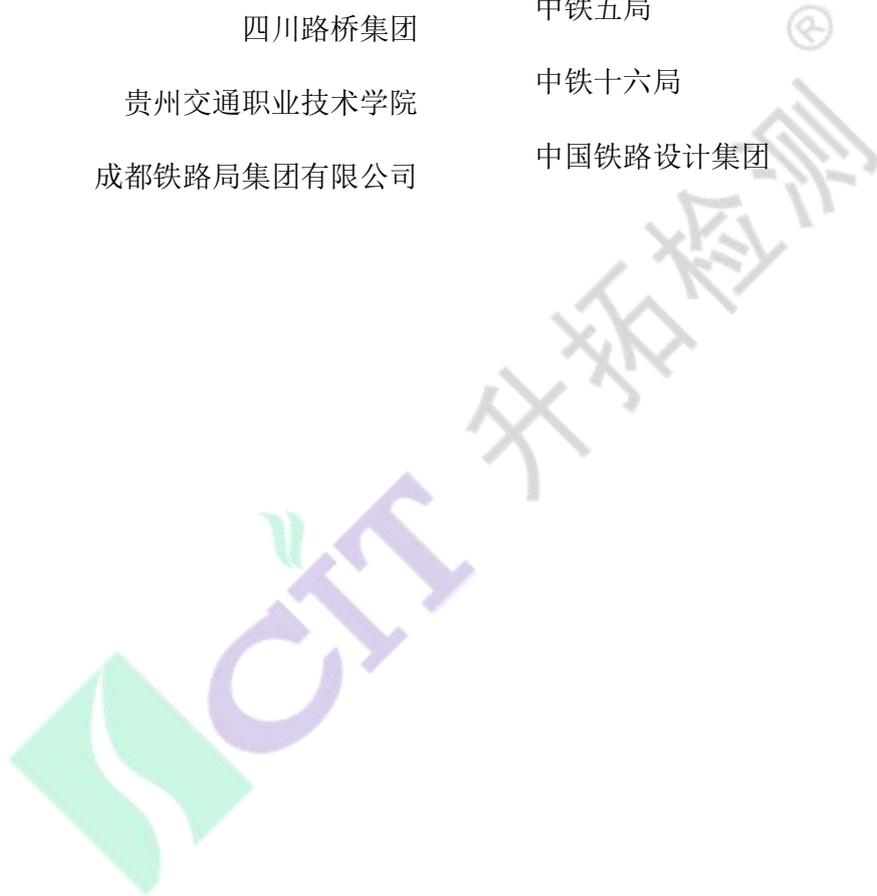
中铁桥科院

四川交通职业技术学院

中铁五局

中铁十六局

中国铁路设计集团



---

## 版本修订说明

V1.01: 增加了裂缝测试章节

V1.02: 增加了大体积混凝土脱空阈值的自动判定 (2.2.5) 和钢筋连接套筒检测 (4.2)

V1.03: 增加了铁路隧道衬砌质量检测案例 (2.4.2)

V1.05: 增加了混凝土结构厚度检测 (第 5 章)

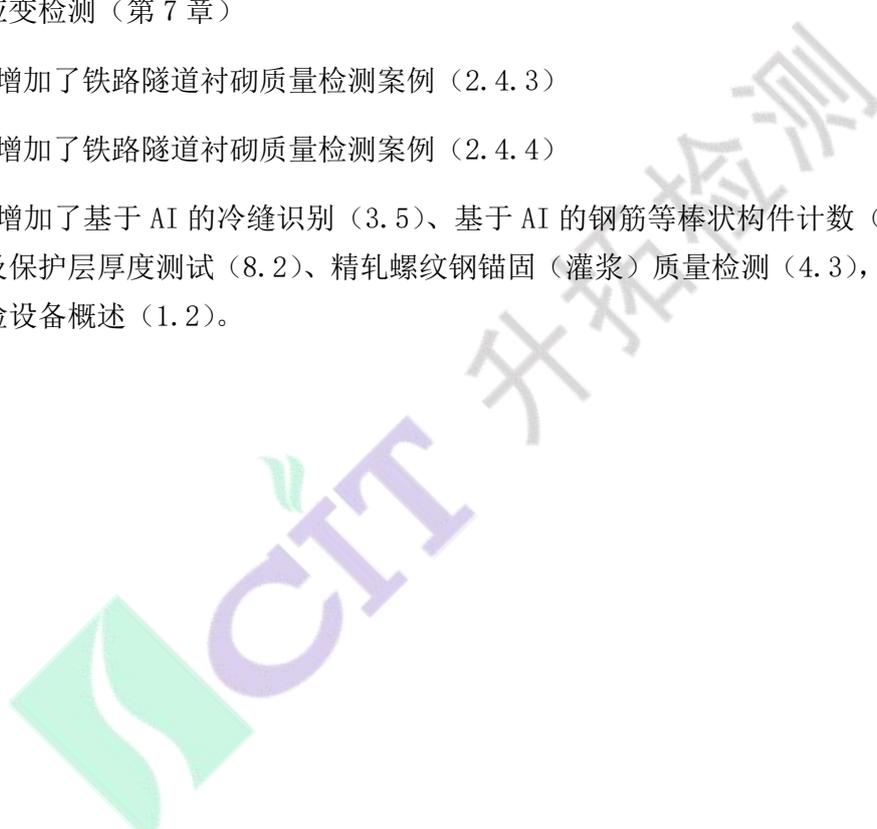
V1.06: 增加了锚杆检测 (第 6 章)

V1.07: 增加了混凝土底板缺陷检测 (2.3.8), 混凝土梁灌浆缺陷、厚度检测 (5.2.2), 基桩小应变检测 (第 7 章)

V1.08: 增加了铁路隧道衬砌质量检测案例 (2.4.3)

V1.09: 增加了铁路隧道衬砌质量检测案例 (2.4.4)

V1.10: 增加了基于 AI 的冷缝识别 (3.5)、基于 AI 的钢筋等棒状构件计数 (8.1)、钢筋直径及保护层厚度测试 (8.2)、精轧螺纹钢锚固 (灌浆) 质量检测 (4.3), 修订了穿戴式巡检设备概述 (1.2)。



---

## 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)6861-1516、6861-1511、6861-1527
  - ✘ MAIL: [Support@scentralit.com](mailto:Support@scentralit.com)
  - ✘ HTTP: [www.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](http://www.scentralit.com/download_201003181343459218.html)

