

混凝土结构脱空检测技术体系

(V1.50)



2012-06-01 初稿

2022-08-04 第 42 次修订

2023-04-30 第 43 次修订

2023-09-30 第 44 次修订

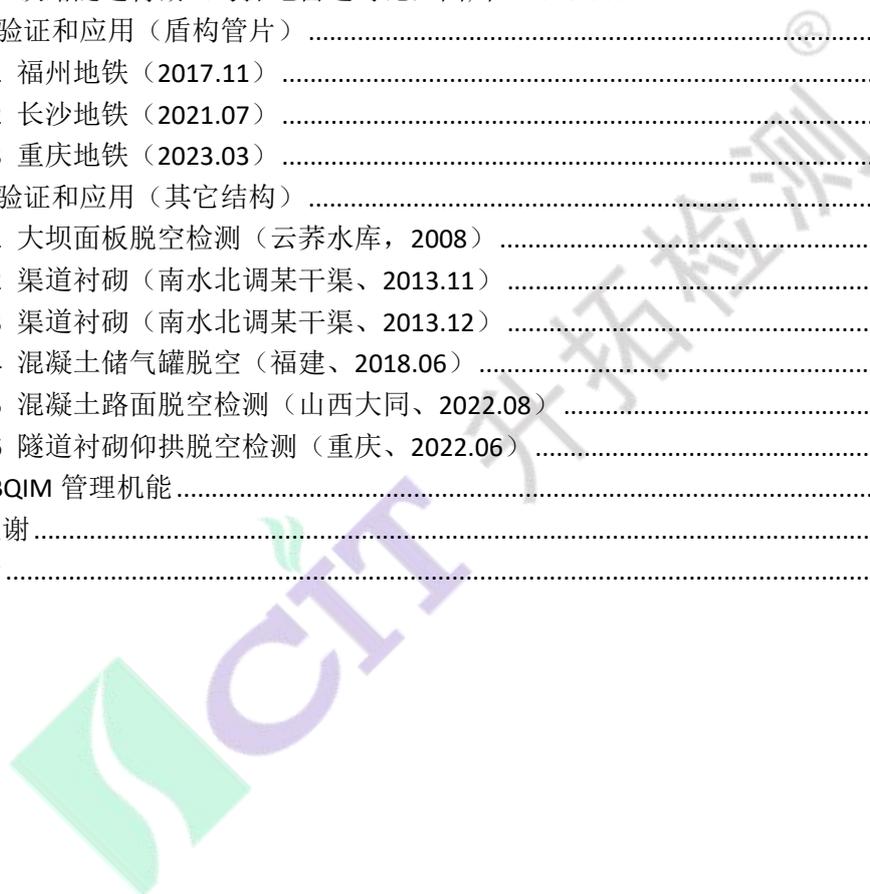
四川升拓检测技术股份有限公司

www.scentralit.com

目录

第 1 章 概述.....	1
1.1 脱空现象及危害.....	1
1.2 脱空检测技术概述.....	2
1.3 脱空检测技术及设备的开发.....	2
第 2 章 脱空检测原理.....	3
2.1 脱空检测的基本概念.....	3
2.1.1 脱空的定义和分类.....	3
2.1.2 脱空对测试信号的影响.....	3
2.2 脱空检测原理及方法.....	4
2.2.1 检测方法概述.....	4
2.2.2 振动法.....	4
2.2.3 弹性波雷达（EWR）法.....	5
2.2.4 冲击回波法（IE）.....	6
2.2.5 弹性波计算机断层扫描（CT）.....	6
2.2.6 影响因素与注意事项及检测流程.....	6
2.2.7 脱空的判定.....	6
2.2.8 脱空位置的 3D 显示.....	7
2.3 脱空厚度的检测.....	7
2.3.1 基本原理.....	7
2.3.2 测试精度和范围.....	8
2.3.3 其他图形解析机能.....	8
2.4 与其它检测方法的对比.....	8
2.4.1 与电磁雷达的对比.....	8
2.4.2 与超声波的对比.....	8
2.5 测试效率的提高.....	9
2.5.1 移动式测试装置.....	9
第 3 章 钢管混凝土.....	9
3.1 检测方法及原理.....	9
3.1.1 钢管混凝土的检测.....	9
3.1.2 压力隧道脱空检测.....	10
3.1.3 检测分辨率要求.....	10
3.1.4 检测方案.....	10
3.2 模型验证.....	10
3.2.1 混凝土块（理工升拓无损检测实验室，2010）.....	10
3.2.2 钢板/混凝土块（沈阳建筑工程大学，2015.09）.....	11
3.3 现场验证及测试.....	11
3.3.1 钢管混凝土拱（甘肃刘家峡，2013.02）.....	11
3.3.2 钢管混凝土拱（湖北宜昌，2015.03）.....	12
3.3.3 钢管混凝土（四川成都，2019.01）.....	13
3.3.4 广西路桥来宾某钢管混凝土脱空检测（广西来宾、2022.02）.....	14
3.3.5 宜昌某大桥主跨中承式钢管混凝土质量检测（宜昌、2022.09）.....	15

3.3.6 钢管混凝土脱空检测（河南郑州中牟县、2022.10）	16
3.4 特点、适用范围及检测流程	16
3.4.1 与超声波检测的比较	16
3.4.2 特点、适用范围及检测流程	17
第4章 隧道、地下洞室及其它	17
4.1 模型试验	17
4.1.1 深层脱空检测（中建三局实验室，2013.04）	17
4.2 现场验证和应用（隧道衬砌）	18
4.2.1 引水隧道（南水北调，2013.12）	18
4.2.2 地下厂房衬砌（溪洛渡水电站、2013.12）	18
4.2.3 铁路隧道衬砌（与探地雷达对比，陕西、2016.11）	19
4.2.4 铁路隧道衬砌（与探地雷达对比，四川、2018.08）	20
4.3 现场验证和应用（盾构管片）	23
4.3.1 福州地铁（2017.11）	23
4.3.2 长沙地铁（2021.07）	23
4.3.3 重庆地铁（2023.03）	24
4.4 现场验证和应用（其它结构）	25
4.4.1 大坝面板脱空检测（云莽水库，2008）	25
4.4.2 渠道衬砌（南水北调某干渠、2013.11）	26
4.4.3 渠道衬砌（南水北调某干渠、2013.12）	27
4.4.4 混凝土储气罐脱空（福建、2018.06）	27
4.4.5 混凝土路面脱空检测（山西大同、2022.08）	28
4.4.6 隧道衬砌仰拱脱空检测（重庆、2022.06）	29
第5章 BQIM 管理机能	30
结语与致谢	30
技术支持	30



第 1 章 概述

1.1 脱空现象及危害

脱空现象主要出现在两个方面，即普通混凝土结构中的脱空（也称“剥离”），以及层状、复合结构中结构面间的脱空。

1) 普通混凝土结构中的脱空（剥离）

在混凝土结构的表层部分，由于钢筋锈蚀、表层裂缝、施工冷缝等原因，会产生剥离等现象。对隧道衬砌的天顶、立交桥的下部等部分，剥离引起的混凝土脱落有可能威胁到通行车辆、行人的安全。例如，1999年6月在日本山阳新干线的福冈隧道就发生了衬砌混凝土脱落事故，脱落的混凝土块（约 $2 \times 0.5 \times 0.5\text{m}$ ）砸在高速运行的列车（新干线光号）顶部，造成重大事故。

2) 层状、复合结构中结构面间的脱空

对于层状或者复合结构，不同层面、结构间良好的粘结对于保证结构的性能具有极其重要的意义。常见的结构有：

- (1) 钢管混凝土：由于钢管对混凝土提供围压从而提高了混凝土的抗压强度，使得钢管混凝土的抗压承载力大大优于普通混凝土。因此，钢管混凝土在高层建筑、大跨度桥梁中得到了广泛的应用。但钢管与混凝土间可能产生的脱空使得混凝土的围压下降，从而降低了混凝土的抗压强度。严重时可能造成混凝土的压碎，也可能使得钢管本身发生座屈，进而大幅降低结构的承载力；
- (2) 有压引水钢管洞：由于压力管道在设计时，内压由钢管和周围的衬砌联合承担。如钢管与衬砌产生较大面积的脱空，使得钢管单独承担内压，进而造成钢管的应力恶化以及不均匀变形，严重时还可能造成钢管的破损；
- (3) 高铁轨道板：为了缓冲列车车辆运行时产生的振动，高铁的轨道板通常采用层状复合结构，即由顶板、垫层和底板构成。其中，由于施工以及冲击力的作用下，垫层会出现破碎，以及与顶板间产生脱离，从而影响了轨道板的整体性，对行车产生不利影响。
- (4) 混凝土面板：对于混凝土面板等结构，脱空也会影响面板的受力状况，严重时也会造成面板的破损，并引起漏水等事故。
- (5) 其它：如底板与基础之间、隧道衬砌与岩体之间等均可能产生脱空，从而影响结构的受力状况。

1.2 脱空检测技术概述

目前，关于脱空的检测技术大致可以分为以下几类：

- 1) 基于远红外线成像：主要检测材料导热性能的不连续性，通常利用日射产生的温度变化，通过对结构表面的温度成像来推断脱空的有无。该方法能检测的脱空深度一般在 10cm 之内，而且需要在上午和傍晚检测，因此一般用于结构物的外壁检测等；
- 2) 基于电磁波（混凝土雷达）：主要检测材料诱电性能的不连续性，利用发射的电磁波在不同介质面上的反射来推断脱空的有无。该方法受金属介质和水的影响很大，而且对空气不敏感，因此仅适合于空洞内有水的检测。对于微细的接触面脱空检测分辨力很低；
- 3) 基于超声波：主要检测材料力学特性的不连续性，利用发射的超声波在不同介质面上的反射来推断脱空的有无。严格来说，该方法也属于弹性波的一类，只是能量小、波长较短。该方法的分辨力较高，但测试时需要将探头与被测面耦合，测试效率低。此外，由于能量衰减快，受混凝土中骨料、钢筋影响较大，因此，其检测深度较浅，一般不超过 10cm；
- 4) 基于弹性波：该方法与超声波类似，利用激发的弹性波在不同介质面上的反射来推断脱空的有无。与超声波相比，激发的能量大，波长较长。因此，该方法的测试范围较深，可达 1 米以上。但分辨力较低，受周围边界的影响大；
- 5) 基于振动：该方法利用锤击等方式诱发轨道板的自由振动，利用层间粘结条件（边界条件）的变化造成的自振模态的变化来推断脱空的有无。该方法的代表为“打声法”，可以利用声波进行非接触式检测，测试效率高。但该方法的测试深度一般在 10cm 之内，对小范围的脱空不敏感；

由此可以看出，基于弹性波和振动的方法是比较有望的检测方法；

1.3 脱空检测技术及设备的开发

为此，我们历时 10 余年，与国内外相关机构合作开发了一整套针对混凝土的浇筑质量、结构的缺陷的综合解决方案和技术体系。该技术体系也可以有效地检测脱空的有无及其规模：

- 1) 脱空的有无、位置；
- 2) 脱空的厚度；

该套技术包含了“打声法”（也称声振法）、“振动法”和冲击回波法（IE），并结合

快速成像技术（QPG）和计算机断层扫描技术（CT），从而大幅提高了测试的精度和应用范围。

大量的工程实践表明，该技术和设备完全可以满足工程实践的需要。



混凝土多功能检测仪

第 2 章 脱空检测原理

2.1 脱空检测的基本概念

2.1.1 脱空的定义和分类

脱空，既是在结构中或者结构面间产生了空隙。由于空隙的产生，隔断了结构中应力的传递，削弱了结构的整体性，从而可能给结构带来严重的危害。

根据脱空面所处的位置，大致可以将脱空分为以下几类：

- 1) 表层脱空：脱空的位置距测试表面在 0.02m 之内，如钢管混凝土、压力钢管等；
- 2) 浅层脱空：脱空的位置距测试表面在 0.02~0.1m 之内，钢筋混凝土的剥离、隧道一、二衬之间的脱空也大多属于此类；
- 3) 深层脱空：脱空的位置距测试表面在 0.1m 之上，高铁轨道板、混凝土面板以及部分隧道衬砌属于此类。

2.1.2 脱空对测试信号的影响

脱空面对测试信号的影响主要体现在：

- 1) 脱空面由于刚性极低，对弹性波有明显的隔断、反射作用；
- 2) 脱空造成结构的约束减少、自由度增加；

2.2 脱空检测原理及方法

2.2.1 检测方法概述

为了更加准确、全面地检测结构的脱空，我们开发了一系列的方法：

- 1) 振动法（包括打声法）：主要反映边界约束条件的变化；
- 2) IE（冲击回波法）/EWR（弹性波雷达）：主要反映机械阻抗的变化；
- 3) CT（弹性波计算机断层扫描）：主要反映材质的变化；

针对不同类型的结构，可按下表选取检测方法。

结构脱空检测各方法的比较

检测方法	同质材料内脱空			异质材料间脱空		
	表层脱空	浅层脱空	深层脱空	表层脱空	浅层脱空	深层脱空
振动法	◎	△/○ ^{注-2}	×/△ ^{注-2}	◎	△/○ ^{注-2}	×/△ ^{注-2}
IE/EWR	○	◎	◎/○	○/×	◎/×	○/×
CT ^{注-1}	○/×	○/×	○/×	△/×	△/×	△/×

注-1：CT检测需要两个对测面，而且测点间距应大于0.8m。

注-2：激振锤越重，脱空检测深度越大。

2.2.2 振动法

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，一方面可以用传感器直接拾取结构表面的振动信号（在此称为“振动法”），也可以利用工业拾音器（麦克风）拾取声波信号（在此称为“打声法”或“声振法”）。

1) 振动法的基本原理

通常，在产生脱空的部位，振动特性会发生以下变化（如下图）：

- (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。

这两个特性对激振力的大小没有要求。另一方面，剥离会引起结构抵抗特性的变化，也就是说，剥离使得参与振动的质量减少，在同样的激振力下，产生的加速度会增加。因此，用冲击锤激振并用激振力归一化后，加速度幅值也是一个重要的指标。

2) 振动法的参数取值

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。由上式可知：

- (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。

3) 参数的例外

在上述脱空的定义中，脱空面两侧的混凝土相互脱开，因此在一侧激发的弹性波无法传递到另一面，从而减少了弹性波亦即振动的衰减。在测试结果中的体现为持续振动时间的延长。

但是，当脱空面中填充有碎屑时，其对混凝土的振动有较强的衰减作用，反而有可能使得持续振动时间的缩短，因而按理本理论计算得到的脱空指数反而会更低。此时，结合 EWR（弹性波雷达）的方法就显得必要。

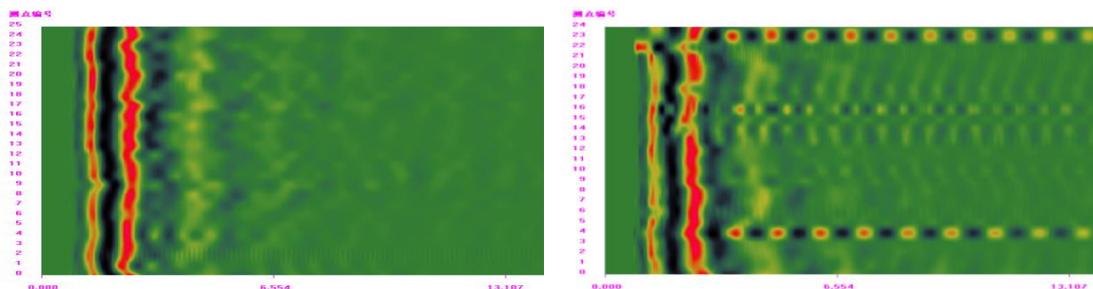
2.2.3 弹性波雷达（EWR）法

与振动法测试相似，沿测试对象表面连续激发弹性波信号，信号在遇到空洞、脱空面等疏松介质时会产生反射。通过抽取该反射信号并进行相应的处理，即可识别脱空的有无及深度位置。

其中，在时域上分析和图形显示，即为弹性波雷达法（EWR）。

对于测试对象较厚，激发的弹性波信号难以多次反射的时候，EWR 是一种有效的方法。但是，由于每次激发的力度、波长等均有所不同，因而反射的信号也有所禅意。为此，我们开发了基于响应函数处理的弹性波雷达方法，有效地消减了由于激振信号差异带来的影响。

下图是对某铁路仰拱的内部缺陷进行检测的 EWR 结果图。



EWR 波形（隧道仰拱检测、左：质量好无明显缺陷；右：质量差，有缺陷）

2.2.4 冲击回波法 (IE)

当对 EWR 测试的信号在频域上进行分析时,即为冲击回波法。

2.2.5 弹性波计算机断层扫描 (CT)

对于可以对测的混凝土结构,采用弹性波 CT 也是一个可行的方法。弹性波 CT 不仅可以测试脱空情况,而且可以测试混凝土的内部缺陷。

详细请参阅“SCIT-1-TEC-00-冲击弹性波检测技术基本原理”。

2.2.6 影响因素与注意事项及检测流程

1) 影响打声或振动特性的主要因素

- (1) 激振、拾振 (声) 位置
- (2) 激振方法 (锤重、锤头形状、材质)
- (3) 边界条件
- (4) 混凝土的性质 (表面状态、含水率等)
- (5) 缺陷状况

2) 主要注意事项

- (1) 阈值的设定: 需要说明的是,上述各个参数均只有相对意义。因此,在实际测试,根据健全部位的测试结果事先确定剥离的阈值是必要的。
- (2) 激振锤的选取: 对于较深剥离的测试通常需要更大的激振锤。
- (3) 与其他方法的结合: 对于较深的剥离,冲击回波 (重复反射) 法更为有效;
- (4) 打声法中的注意事项: 由于空气的存在,使得打声法的分辨力要弱于振动法。因此,防止周围噪声的混入、保持测试距离的一致是有益的。
- (5) 对于 CT 法,仅适用于钢管混凝土等具有两个测试面的结构。而且,若管径较小 (如低于 0.8 米),波速的测试误差会较大。

此外,根据上述参数,不仅可以测试剥离,对结构状态也可以进行初步的判断。

2.2.7 脱空的判定

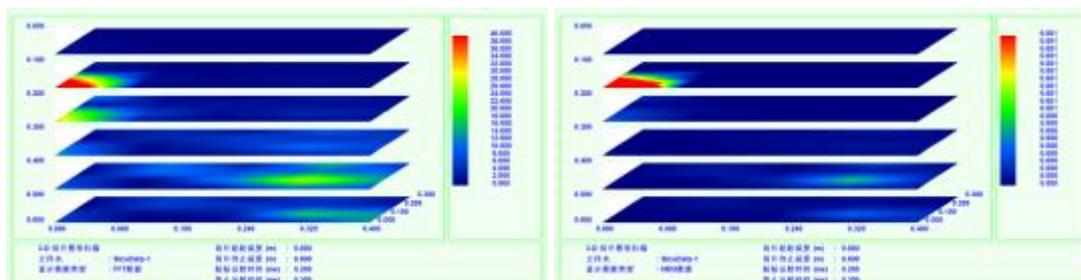
在脱空检测中,脱空与否的阈值是关键问题之一。在大多数情况下,难以给出阈值的理论计算方法,因此只能采用统计的方法确定。在本系统中,我们根据是否有健全部

位的标定数据而采用不同的方法：

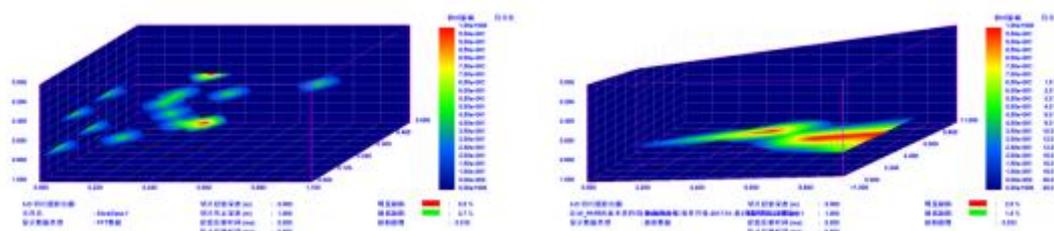
- 1) 有健全部位标定数据的情形
- 2) 无健全部位标定数据的情形

2.2.8 脱空位置的 3D 显示

在本体系中，对脱空位置可进行 3D 显示，包括切片显示（3DS）和真三维显示（T3D）。



EWR 层叠切片 3DS (左: FFT、右: MEM)



脱空位置的 T3D 显示

2.3 脱空厚度的检测

2.3.1 基本原理

当钢板脱空面积较大时，其脱空厚度可根据频谱分析（EWR）的方法检测。

需要指出的是：

- 1) 混凝土中剥离：有效测试深度由测试方法决定。对于打声法（声振法），其测试深度一般不超过 0.20m，而采用 EWR（弹性波雷达）则深度可达 1.0m；
- 2) 钢管脱空：由于钢管的壁厚一般较薄，用打声法（声振法）容易测出脱空的有无。但若需要测试脱空的厚度，则也需要用 EWR；
- 3) 由于钢板的振动有多个振型，区分钢板振动和空气柱振动是一个关键问题；

2.3.2 测试精度和范围

- 1) 混凝土中剥离：有效测试深度由测试方法决定。对于打声法（声振法），其测试深度一般不超过 0.20m，而采用 EWR（弹性波雷达）则深度可达 1.0m。
- 2) 钢管脱空：由于钢管的壁厚一般较薄，用打声法（声振法）容易测出脱空的有无。但若需要测试脱空的厚度，则也需要用 EWR。

2.3.3 其他图形解析机能

- 1) 快速成像技术（QPG）

测试方法与 3DS 相同，测试的结果可以快速形成平面图像。

2.4 与其它检测方法的对比

2.4.1 与电磁雷达的对比

电磁雷达由于测试效率较高，也是测试脱空的一种比较常用的手段，其通过测试在脱空面的反射信号来判断脱空的有无。

- 1) 雷达测试的原理
- 2) 对脱空厚度敏感性的比较

如上所述，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，空气的阻抗（ ρv ）约为混凝土阻抗的 1/25000（0.004%），因此，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 1600MHz、400MHz 的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，在混凝土内微波的波速取 100m/us。

可见，电磁雷达对脱空的识别能力会受到脱空厚度、天线频率的很大影响。特别是对于厚度在 mm 级的脱空，雷达从理论上是无法检测的。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，尤其是水、气共存时很容易漏检。

2.4.2 与超声波的对比

理论上，利用超声波也可测试脱空，但在实际应用上，由于超声波测试效率低，测试范围窄等缺陷，在实际工程中极少应用。

2.5 测试效率的提高

2.5.1 移动式测试装置

为了提高测试效率，我们开发了移动式测试装置（水平型和垂直型）。在此，我们就混凝土试块（厚 20cm，中部激振）和地板进行了检测对比。传感器放大倍率均为 30。

第 3 章 钢管混凝土

钢管混凝土是指在钢管中填充混凝土而形成、且钢管及其核心混凝土能共同承受外荷载作用的结构构件。众所周知，混凝土的抗压强度高，但抗弯能力很弱。而钢材，特别是型钢的抗弯能力强，具有良好的弹塑性，但在受压时容易失稳而丧失轴向抗压能力。而钢管混凝土在结构上能够将二者的优点结合在一起，可使混凝土处于侧向受压状态，其抗压强度可成倍提高。核心混凝土处于三向受压状态，能够充分发挥两种材料的优点，使混凝土的强度、塑性和韧性大为改善，可以避免或延缓钢管发生局部屈曲，从而使钢管混凝土具有强度高、重量轻、延性好、耐疲劳、耐冲击等优越的力学性能和省工省料、架设轻便、施工快速等优点。目前广泛应用于桥梁拱架、桥墩以及高层建筑柱子等。

对于钢管混凝土而言，钢管与核心混凝土之间的脱空（脱粘）是一个非常严重的问题，其会使整个钢管混凝土的受力模式产生重大变化，因此需要尽量避免。脱空的成因主要有以下两类：

- 1) 核心混凝土不密实引起的脱空：由于核心混凝土在浇筑过程中的缺陷引起的混凝土与钢管界面间的孔洞、水膜层造成的脱空；
- 2) 脱粘引起的脱空：在轴压、温度、收缩等因素作用下，核心混凝土与钢管接触面间产生的拉应力、剪应力超出两者的粘结强度而产生的脱空。例如，钢管混凝土拱桥构件处在大气中，直接承受阳光作用。在夏天钢管表面温度高达 80℃，而内部核心混凝土为 50℃。钢管混凝土拱经过 5~10 年，核心混凝土收缩、徐变完成（相当于温降 20℃）。这 2 种情况共同作用，相当发生约 70℃温差，在大直径钢管中导致钢管和核心混凝土脱空（即钢管与核心混凝土分离），特别是在拱顶部位。

3.1 检测方法及原理

3.1.1 钢管混凝土的检测

对于钢管混凝土结构，可采用两种方法检测

- 1) 诱导振动法：检测管壁与核心混凝土之间的脱空；
- 2) 弹性波 CT：除了检测核心混凝土与管壁间的脱空以外，还可检测核心混凝土的密实状况及内部缺陷。

对于钢管混凝土的弹性波 CT，有两种布线方法：立面布线、平面布线。

3.1.2 压力隧道脱空检测

压力引水隧洞脱空的检测的方法与钢管混凝土的单面检测相同，但由于结构型的区别，在检测分辨率、流程等方面也有所不同。

3.1.3 检测分辨率要求

钢管混凝土和压力隧道都具有长度长、规模大、结构重要性高等特点。检测分辨率要求与测试效率、测试成本均有密切关系。因此，合理确定检测分辨率是有必要的。

3.1.4 检测方案

综合考虑检测效率和分辨率要求，提出结合振动法和弹性波雷达扫描（EWR）的检测方案。即检测分 2 阶段进行：

第 1 阶段：脱空的有无及位置的定性快速测试

采用振动法，即用激振锤击打钢管内表面，通过诱发振动的频率、持续时间以及振幅来定性地判断脱空的有无。

第 2 阶段：脱空的有无及厚度详细检测

采用测试仪器，对第 1 阶段测试有脱空可能的区域利用 EWR 进行详细检测，并对脱空的厚度进行检测。

3.2 模型验证

3.2.1 混凝土块（理工升拓无损检测实验室，2010）

我们浇筑了混凝土块，并在其中预埋了如下图所示的缺陷。通过振动法和弹性波雷达扫描（EWR）、快速成像（QPG）的分析，可以很好地识别了预埋的缺陷。

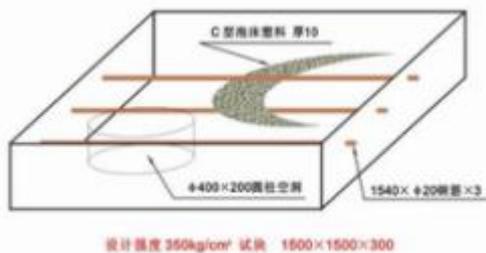


图 3- 2-1 混凝土试块及预埋缺陷

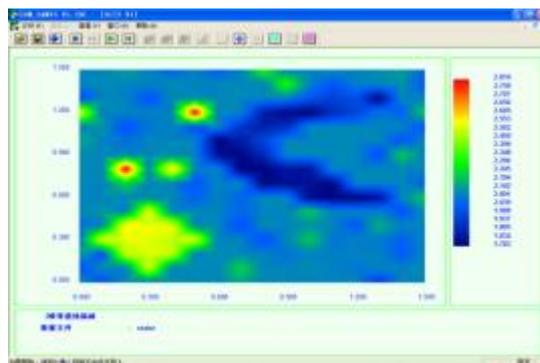


图 3- 2-2 综合测试结果 (频率)

3.2.2 钢板/混凝土块 (沈阳建筑工程大学, 2015.09)

在沈阳建筑工程大学实验室中,在混凝土块上粘结了钢板。在钢板与混凝土块之间,预设了缺陷(填充软性材料)和脱空。



试验块场景

从检测结果可以看出:

- 1) 对于纯脱空, 测试结果与实际状况十分符合;
- 2) 对于填充区域, 测试得到的脱空指数反而比正常部位偏低。

3.3 现场验证及测试

3.3.1 钢管混凝土拱 (甘肃刘家峡, 2013.02)

受甘肃交科院委托,我们对甘肃境内刘家峡钢拱混凝土桥进行了混凝土脱空检测。测试方法包括 CT (透过法, 弹性波断层扫描)、EWR (弹性波雷达)。

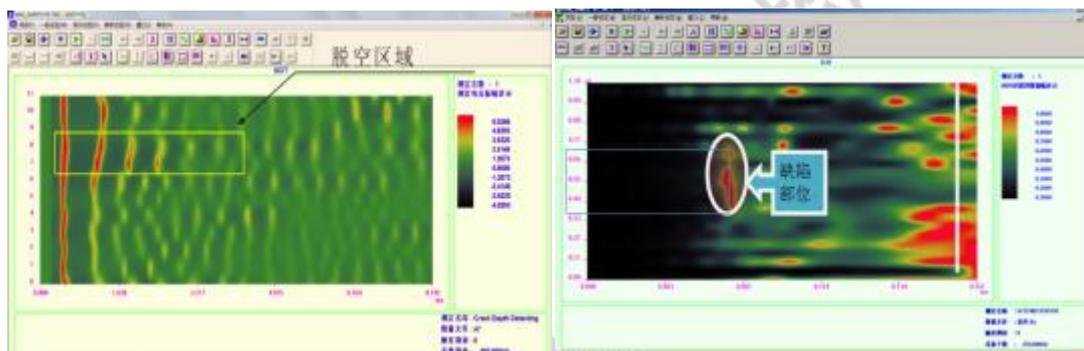


测试对象及试验情景

1) 对测法测试 (CT)

图中黑框所圈区域为波速较低区域，证明此处存在缺陷。该方法可定性确定缺陷大致区域，尽管不能完全确定脱空的位置，但测试效率较高。

2) 弹性波雷达法 EWR



弹性波雷达法等值线图

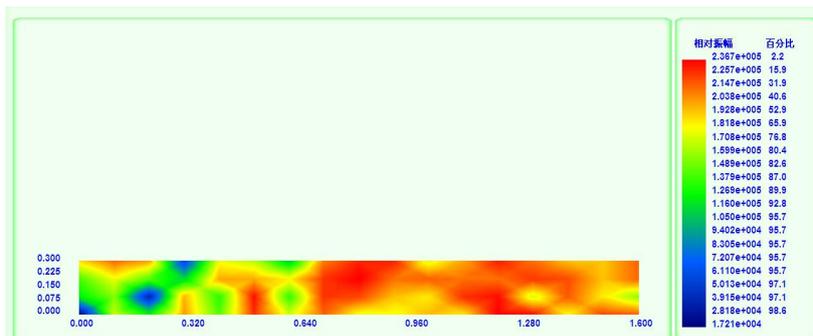
3.3.2 钢管混凝土拱 (湖北宜昌, 2015.03)

1) 概述

应武汉桥科院邀请，对位于宜昌市五峰新城的大桥的钢管混凝土脱空进行了检测和验证。桥梁为独拱肋钢管混凝土拱梁组合桥，桥长 97.2m，宽 24m。主拱肋高 140cm，宽 310cm，左右钢管外径均为 140cm，壁厚为 25mm。

2) 检测结果

我们采用诱导振动法对其进行测试，发现该桥某区域存在大面积脱空 (图 1)。施工单位随即对测试结果显示脱空位置处进行钻孔验证 (如图 2)。因脱空深度为几毫米，通过肉眼无法很好判断，因此对钻孔区域进行注水验证。由于注入的水迅速渗透，表明该当区域存在大面积脱空，从而验证了检测结果。



测试区域等值线图（图示红色区域即为脱空区域）



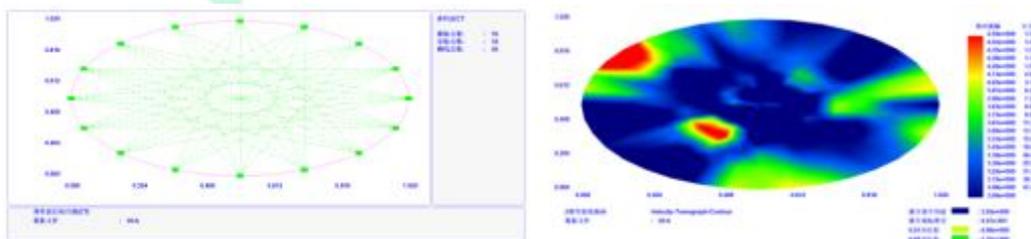
钢管桥外观及钻孔验证情景

3.3.3 钢管混凝土（四川成都，2019.01）

1) 概述

受相关单位委托，对简阳天府机场新型钢管混凝土柱体结构（试验柱），进行钢管脱空及内部混凝土质量检测。

现场共计测试 6 个墩柱，16 个环形 CT 剖面。墩柱直径为 1m，钢管壁厚 0.01m，直径为 1.02m，周长约为 3.2m，本次测试一个圆周剖面布置 16 个测点，测点间距为 0.2m，测线采用部分交叉，共计 45 条测线。



1-A 剖面测线布置及二维等值线云图

2) 小结:

(1) 1-A 剖面：环线整体波速较低，2-4、6-10、11-15 范围出现低波速，可能存

在脱空，无法判断内部混凝土质量；

(2) 8-B 剖面：环线整体波速较高，混凝土整体质量较好。

(3) 所测试的 16 个环形剖面中，较多处疑似存在脱空，可能是自密实混凝土收缩、或者天寒引发，宜引起注意；

3.3.4 广西路桥来宾某钢管混凝土脱空检测（广西来宾、2022.02）

受广西路桥技术中心委托邀请，我公司对来宾市某钢管拱桥进行钢管混凝土脱空检测演示，检测方法为振动法。

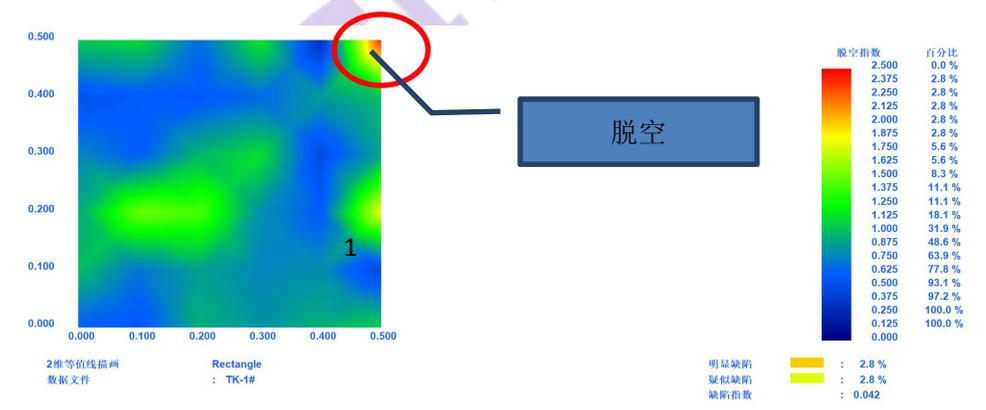


左：钢管与混凝土脱空检测



右：钢管混凝土内部质量检测

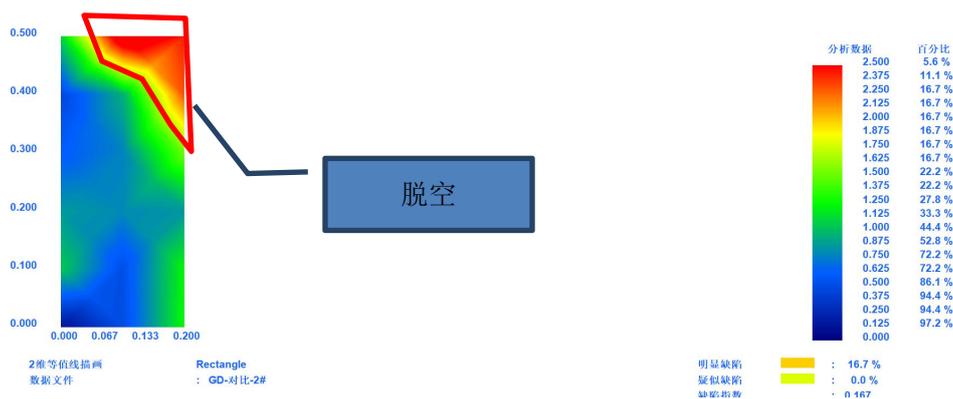
1) 1#位置：拱脚处



1#位置：拱脚处结果图

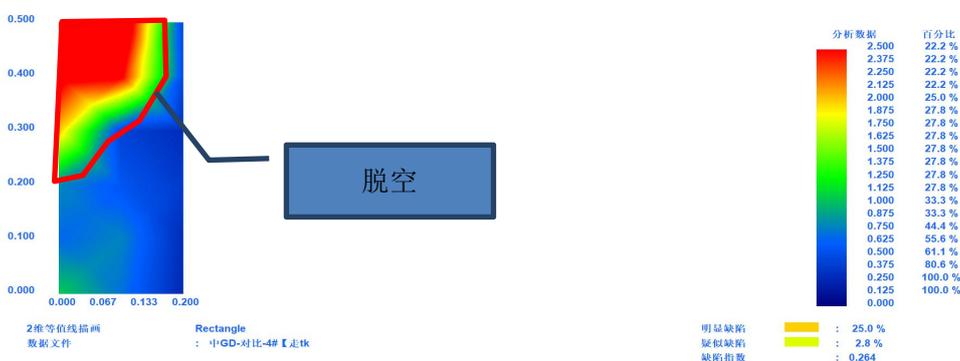
说明：1#位置右上角处脱空为踏板脱空处的对比数据，检测结果与实际相符。

2) 2#位置：拱顶处



2#位置：拱脚处结果图

3) 3#位置：拱顶偏下处



3#位置：拱脚处结果图

通过测试，2#位置与 3#位置上部处脱空为现场测试时发现的脱空，现场也与对应位置进行了敲击验证，检测结果均与实际相符。

3.3.5 宜昌某大桥主跨中承式钢管混凝土质量检测（宜昌、2022.09）

受湖北某公司委托，我公司技术人员对宜昌市某大桥主跨中承式钢管混凝土质量进行检测。



大桥外观

测区采用矩形网格布置，测点间隔 0.1m（详见图 3-3-38），测试面积分别为 0.12 m²、0.15 m²。检测结果如图 3-3-39。

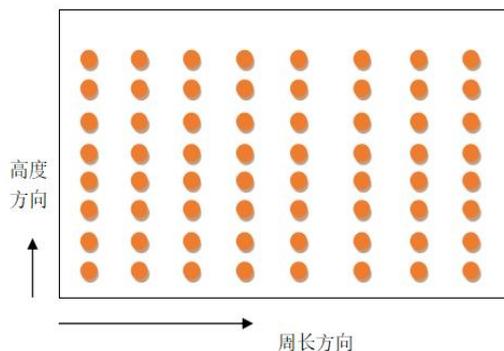


图 3-3-38 脱空检测测区布置示意图

通过数据分析，其结果图中暖色区域判定为脱空区域。经现场敲击验证，本次检测脱空区域与现场使用敲击法听声情况基本吻合。

3.3.6 钢管混凝土脱空检测（河南郑州中牟县、2022.10）

受某单位委托，对某高速项目索塔钢壳混凝土结构进行脱空检测。本次采用振动法进行钢管混凝土脱空检测，检测场景请参考图 3-3-40。共计检测 12 个测区，并在委托方设定的预制模型上进行了缺陷区域的检测，可以准确地检测到预设缺陷位置。



现场标定及检测

按《冲击弹性波法检测混凝土缺陷技术规程》(T/CECS 925-2021) 相关要求，现场对预设模型的脱空区域进行了标定。

由检测结果可知，本次索塔钢壳混凝土脱空检测 12 个测区明显缺陷占比均为 0%，疑似缺陷占比均小于等于 4%，缺陷指数均小于等于 0.02。部分检测结果如图 3-3-43。

在模型上标定后可以准确地检测到预设缺陷位置。现场演示测试可以高效准确地检测目标结构，得到客户的认可。

3.4 特点、适用范围及检测流程

3.4.1 与超声波检测的比较

目前，国内相关规程中，对于钢管混凝土的脱空检测均是采用超声波透过的方法。

然而，理论和实践均证明，采用超声波检测脱空具有很大的缺陷。其原因在于在钢管表面接受的超声波的初始信号，往往是沿钢管壁，而不是沿管中混凝土传来：

- 1) 超声波在钢管壁中的传播波速（一般在 5.6~6.3km/s）要远高于在混凝土中的传播速度（一般在 3.5~5km/s）。即使考虑 1.5 倍左右的路程关系，在许多时候也是在钢管壁中传播的超声波先到；
- 2) 在混凝土中传播的超声波的衰减要远大于在钢管壁中的衰减。

3.4.2 特点、适用范围及检测流程

上述 3 种方法（振动法、EWR 和 CT）相辅相成，可以测试目前各类钢管混凝土、钢内衬的脱空。

对于钢管混凝土内部的缺陷、空洞等，则需要采用 CT 检测。而当混凝土钢管的直径小于 0.80m 时，检测精度会受到一定的影响。

第 4 章 隧道、地下洞室及其它

4.1 模型试验

4.1.1 深层脱空检测（中建三局实验室，2013.04）

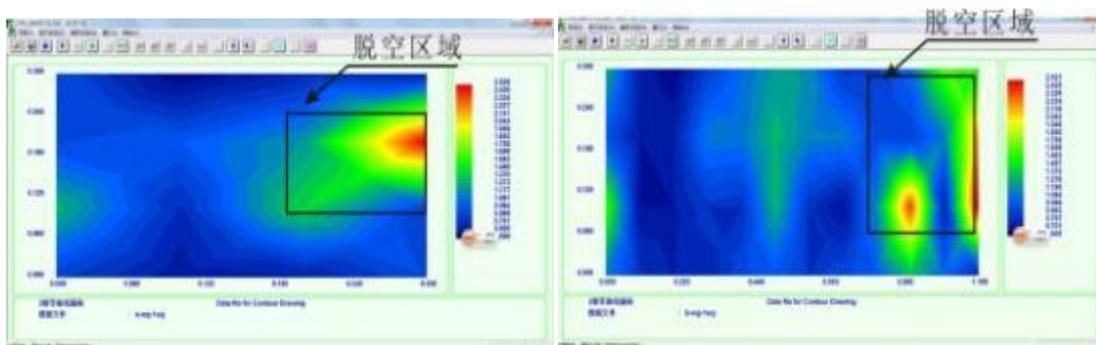
对实验室模型进行了测试，照片正面定义为 A 测试面，背面定义为 B 测试面，测试对象如下图：



试验场景

EWR 扫描等值线图

经过综合分析，我们发现在模型中部深度方向约 15cm，宽度方向约 20cm 的范围内存在缺陷。



振动法脱空检测结果（左：A面、右：B面）

4.2 现场验证和应用（隧道衬砌）

4.2.1 引水隧道（南水北调，2013.12）

1) 概述

应南水北调某机构邀请，对南水北调某隧洞衬砌进行了脱空检测，并与地质雷达进行了对比。对象隧洞衬砌断面为带仰拱的城门洞型，断面尺寸 4.20m×5.80m（宽×高），洞身段边墙和顶拱混凝土衬砌厚度 50cm，另有 20cm 的一衬。底板混凝土衬砌厚度为 60cm。具有埋深大、地下水位高、土体渗透系数小的特点，稳定性极差。



检测情景

2) 检测结果及对比

检测采用了 IE 法（频域）、EWR 法（时域）。同时，采用地质雷达进行了对比验证。可以看出，三种方法吻合良好。

4.2.2 地下厂房衬砌（溪洛渡水电站，2013.12）

1) 概述

应成都勘测设计研究院邀请，对溪洛渡水电站地下厂房衬砌进行了脱空检测和验证。

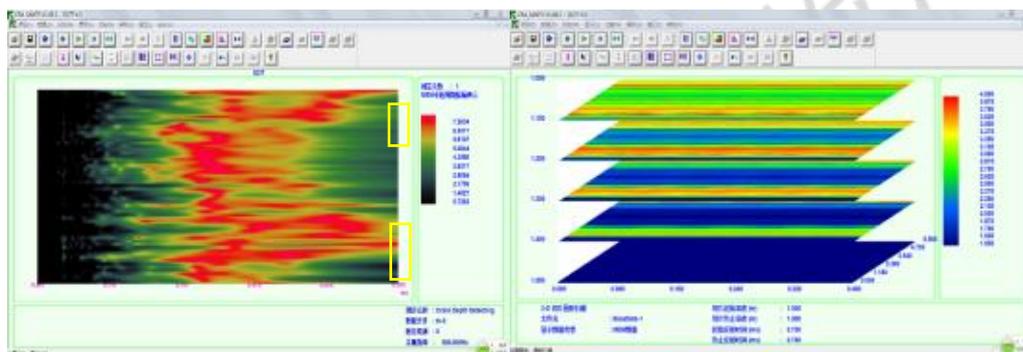
验证场所壁厚 1.1m。



检测情景

2) 检测结果及验证

检测结果表明，在脱空区域，EWR 云图上有明显的反射信号（下图左中黄框的位置）。而混凝土与岩体结合紧密的区域，该反射则不明显。



检测结果（左：单测线、右：3DS 成像）

4.2.3 铁路隧道衬砌（与探地雷达对比，陕西、2016.11）

1) 概述

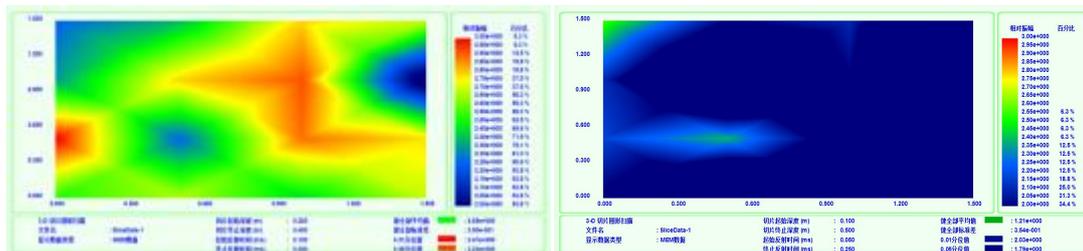
应相关部门邀请，对某铁路隧道的衬砌脱空进行了检测。在此之前，用探地雷达进行了检测并未发现明显异常。



检测情景

2) 检测结果及验证

检测结果发现，在拱顶部分区域存在明显脱空。经钻孔验证证实。



检测结果（左：脱空区域，右：无脱空区域）

4.2.4 铁路隧道衬砌（与探地雷达对比，四川、2018.08）

1) 概述

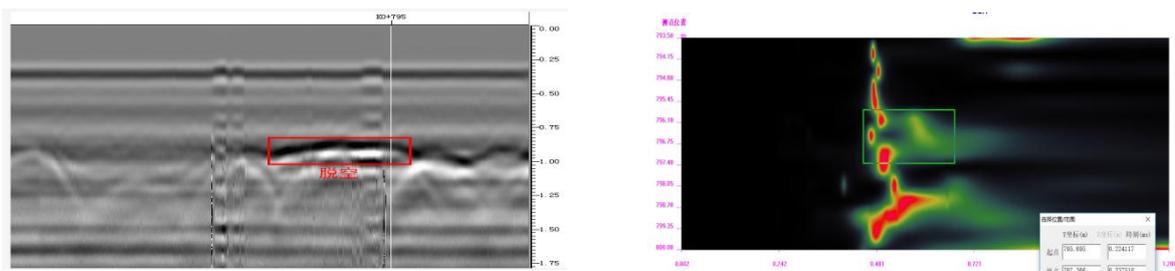
应相关部门邀请，对多个铁路隧道的衬砌脱空进行了检测。其中，用探地雷达和弹性波 IE 法进行了并行检测，并对双方的检测结果进行了对比。



雷达和弹性波检测情景

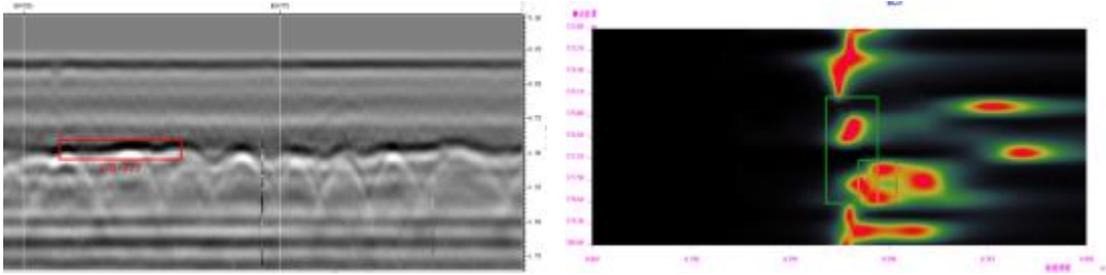
结合钻芯验证发现，在一定条件下，探地雷达和弹性波 IE 法均能较好地检出脱空。而在另外一些条件下，弹性波 IE 法可以检测出探地雷达法则无法检测出的脱空缺陷。

2) 探地雷达与弹性波法一致

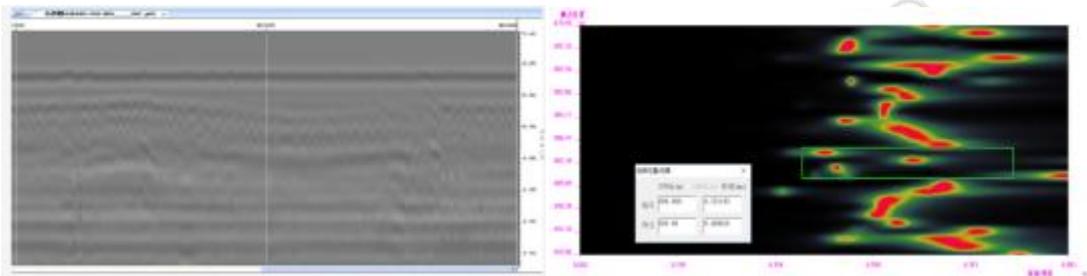


某隧道左拱腰 795-797（脱空深度：55cm）

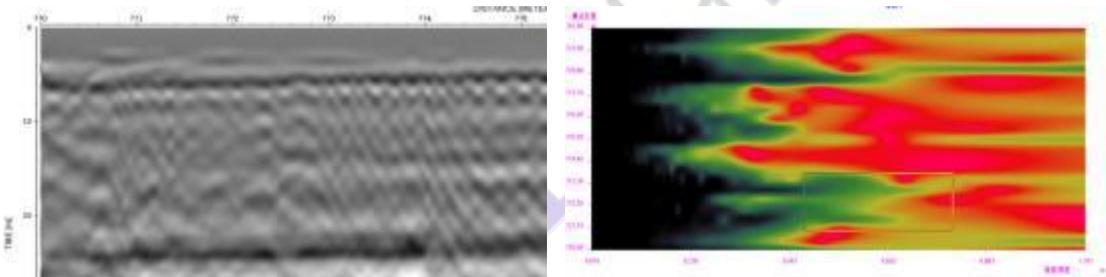
3) 弹性波法检出、探地雷达未检出



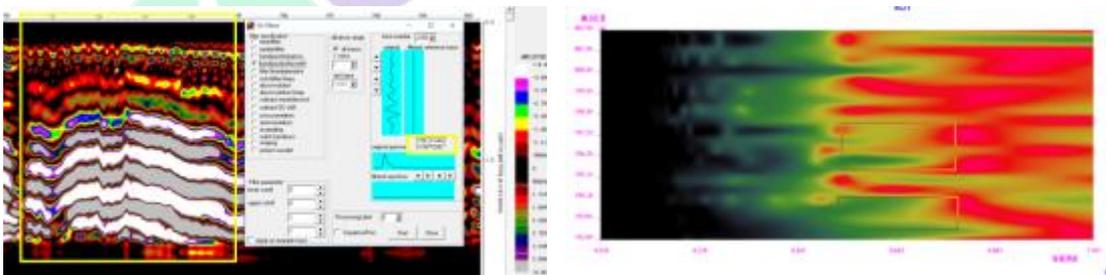
某隧道右拱腰 777-778，弹性波反射延后不规则，故判为不密实



某隧道右拱腰 888，弹性波反射有提前，故判为不密实



某隧道拱顶 771.5-773，雷达波受钢筋网屏蔽，弹性波判为不密实



某隧道拱顶 828-830，雷达波受钢筋网屏蔽，弹性波判为不密实

4) 施工缝的影响

在雷达剖面图中，施工缝两侧存在各 3m 左右长的防水垫层，深度约 18cm，同实际施工情况对应。

而在弹性波图像中，施工缝位置两侧存在提前反射，同施工情况相对应，由于止水

带较长，尤其在 823-825 段，有明显提前反射及不连续现象，易判读为脱空缺陷。

5) 典型的钻孔结果（均为雷达未检出、弹性波检出位置）



某隧道右拱腰 777-778、隧道拱顶 771.5-773



某隧道右拱腰 888

6) 小结

- (1) 探地雷达法在隧道衬砌检测中，如果存在双层钢筋网或者钢筋保护层和厚度较薄的情况时，其雷达波往往无法穿透钢筋网，从而无法有效对钢筋往下部混凝土结构进行检测，同时，探地雷达在表层缺陷检测上存在一定困难，同时对于一些空洞较小的不密实缺陷，雷达波反射信号不明显；
- (2) 冲击弹性波相比电磁波受钢筋、水的影响较小，同时在隧道二次衬砌质量检测中应用效果较好，探地雷达判读缺陷明显的位置，冲击弹性波法亦反映明显，当雷达在钢筋密集区域信号屏蔽严重时，冲击弹性波法依旧可以有效对钢筋网下部混凝土质量进行检测，并且成果直观。在雷达无法做出有效判断的区域，如：表层缺陷、不密实缺陷，冲击弹性波检测效果往往好于探地雷达。
- (3) 但是，冲击弹性波法无法有效对初支以及衬砌背后空洞进行检测，并且测试效率低。特别是当测点间距较宽时，当频谱时域图中波形出现延后现象时但延后量不大时，无法区分是否为衬砌厚度变化所引起的还是衬砌层内脱空导致的波形延后；

4.3 现场验证和应用（盾构管片）

4.3.1 福州地铁（2017.11）

受福建相关的委托，对福州地铁 2 号线地铁管片脱空进行检测，根据提供的信息，该管片厚度为 35cm，设计强度为 C55。其中，标定采用未灌浆的管片。



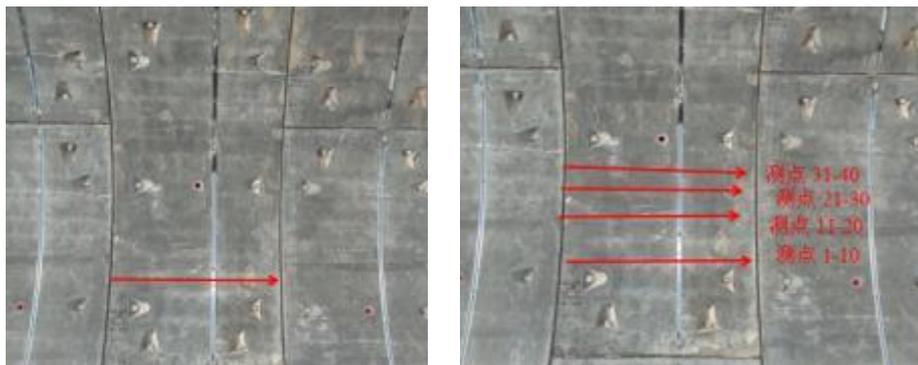
现场检测场景

检测结果表明：

- (1) 被检测的 2#测区在中间及边缘位置发现两处小范围的脱空现象，结合现场情况，这两处下部有螺栓的固定槽（后期采用人工拌和的混凝土填补），导致出现的脱空；
- (2) 检测结果图中的蓝色和红色之间的颜色，表示因管片背部填筑砂浆与管片阻抗差异带来的反射，因此通过结合反射能量进行归一化能够有效避免因阻抗差异带来的误判；
- (3) 基于脱空标定的能量归一化，能有效测试出管片与填筑砂浆的脱空情况。

4.3.2 长沙地铁（2021.07）

受某集团委托，我司于 2021 年 7 月对长沙地铁项目某地铁隧道管片，采用 IAE 进行了注浆缺陷检测演示和验证。本次检测采用了单线检测和矩阵检测两种方式。单线检测可以实现测线范围内的注浆质量，仅能够体现测线范围内注浆缺陷长度，而矩阵方式则可以较为清楚的识别缺陷的位置和大致面积。



现测测线布置图（左侧：单测线 右侧：矩阵布线）

1) 阈值标定

对指定密实和盾尾空（未注浆）位置进行标定，两种状态的标定后的管片背部反射能量值分别为：密实状态：0.0007 未注浆状态：0.0015。

2) 单线检测结果

为了看出检测效果，将3处不同注浆质量测试数据分别与未注浆位置数据进行合成，并进行分析。图中管片底部反射位置频谱越接近暖色表示注浆质量越差，越接近冷色则注浆质量越好。

3) 矩阵方式检测结果

为了实现对管片的面测，检测时，对测试面进行网格布置，横轴方向测点间距0.167m，纵轴方向测点间距为0.15m，并以标定的阈值进行分析处理。

4) 小结

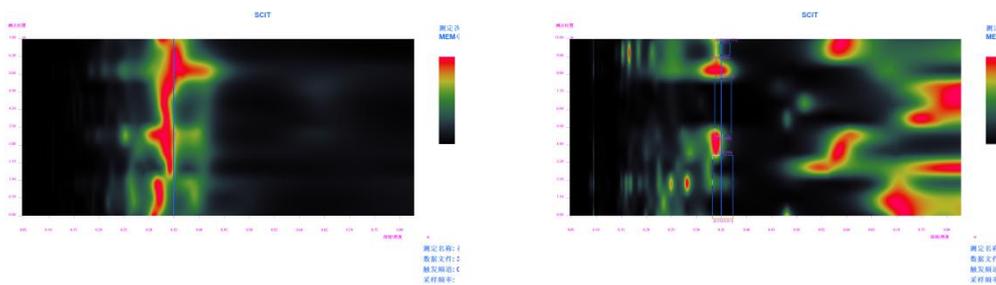
- (1) 通过反射能量的强弱能够准确的判断管片注浆质量；
- (2) 非接触式的冲击回波声频法能够较好的测试管片背后反射能量，并对不同注浆程度的管片质量进行有效检测。

4.3.3 重庆地铁（2023.03）

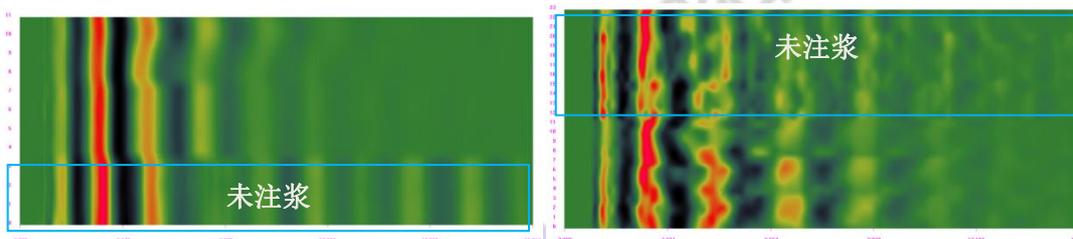
2023年3月应重庆轨道集团委托，我公司采用IAE法和EWR法对重庆地铁项目某地铁隧道管片进行了注浆缺陷检测演示及验证。



现场检测情形，右：EWR



IAE 检测结果图，左：注浆密实，右：未注浆



EWR 检测结果图

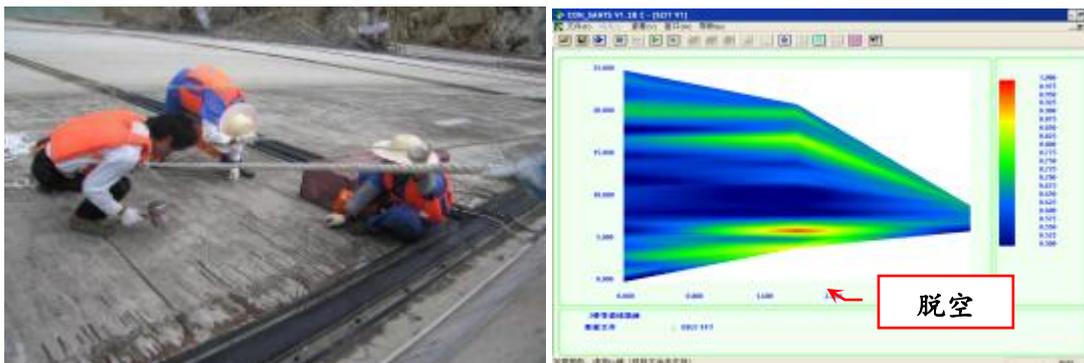
结果表明：

- 1) IAE 可以较好地地区分注浆与未注浆；
- 2) EWR 虽然也能够分辨两者的区别，但其辨识度不及 IAE。

4.4 现场验证和应用（其它结构）

4.4.1 大坝面板脱空检测（云养水库，2008）

云养水库大坝为混凝土面板堆石坝，最大坝高 80m，坝顶长 320 m。为了检查面板的“5.12”震后的健全性，我们对面板中主要的问题（裂缝及面板脱空）进行了检测。



测试对象

测试结果

测试结果表明，面板整体性较好，但在局部（特别是接缝处有明显脱空）。检测结果为面板的补修提供了依据。

4.4.2 渠道衬砌（南水北调某干渠、2013.11）

1) 概述

应南水北调某机构邀请，对某渡槽到引水渠的连接位置，该位置长约 40m，混凝土结构衬砌为渐变结构，渐变区间为 87.3cm~44.7cm，需要测试迎水面混凝土结构衬砌与堤防的接触状况。本次测试位置混凝土结构衬砌厚约为 50cm，设计强度为 C30，其形状随堤防结构扭曲变化。测试方法为振动法，采用大锤激振，结构现场及测试情景如下。



现场测试

2) 检测数量

本次测试共测试 4 个面，测试区域原则为 180cm*180cm，测点间距为 30cm。

3) 小结

- (1) 检测结果表明，测试的 4 块板的边缘部分均有不同程度的脱空现象；
- (2) 利用振动法检测扭曲衬砌段的铺装脱空是基本可行的；
- (3) 厚板、特别是变厚度板的脱空检测是一个困难的课题，需要积累更多的数据以提高精度。

4.4.3 渠道衬砌（南水北调某干渠、2013.12）

1) 概述

应南水北调某机构邀请，对南水北调某引水渠衬砌进行了脱空检测，检测部位厚度为0.1m，采用D30锤激振，测试情景如下。

2) 测试结果及验证

检测结果表明，测试对象均存在不同程度的脱空现象。为此，业主委托检测单位用地质雷达对脱空可疑区域进行了复查，结果一致。



脱空现场测试场景

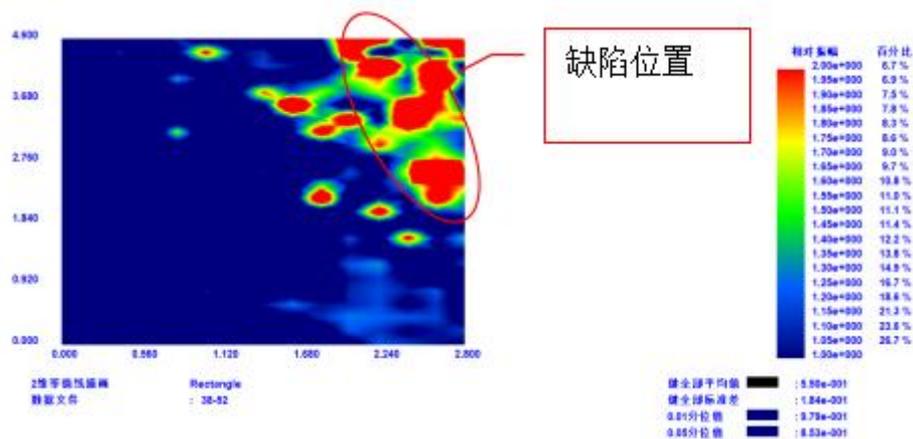
4.4.4 混凝土储气罐脱空（福建、2018.06）

受中建某局委托，我公司技术人员对福建储气罐罐顶进行混凝土脱空检测。根据客户提供的设计资料及对施工工艺的了解，判定缺陷类型为深度在钢筋保护层以下的表面脱空，经过分析，决定采用振动法进行检测。



现场检测场景

经检测，判定了共7处缺陷，典型等值线云图如下：



典型等值线云图

在业主及监理单位的见证下对判定缺陷区域进行了开孔验证，验证结果与判定的缺陷位置、范围一致，受到了业主及监理单位的一致认可。部分开孔照片如下图：



部分开孔照片

4.4.5 混凝土路面脱空检测（山西大同、2022.08）

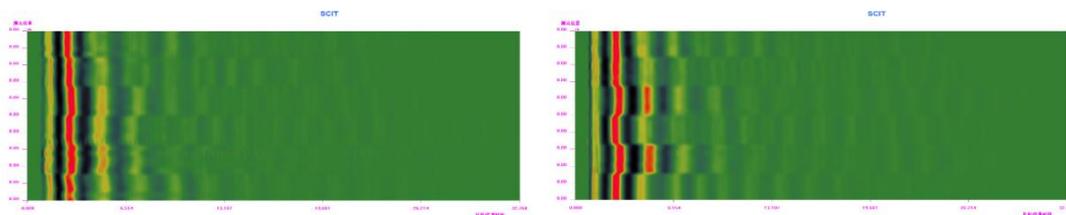
1) 概述

2022年8月，我公司技术人员随山西交科人员使用弹性波雷达设备，对山西大同绕城高速某路段的脱空路面再次进行了相应的测试，路面混凝土厚度在30cm左右，现场测试分标定和检测，取每块路板正中间位置作为路面密实标定区域。

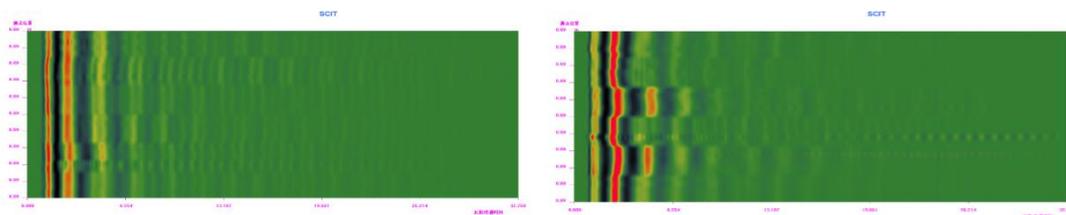
超车道每块板有5个测点，每个测点5条数据，测点分布在四角和正中间。行车道每块板5个测点，由于右半边未封路，行车道5个测点位置均匀分布在紧挨超车道边上。本次共检测了24块路板（超车道19块，行车道5块），全长120M左右，其中检测结果能较明显地区分路面密实区域和脱空区域

2) 超车道测试结果

超车道1、3测点位置的检测结果出现脱空情况的频率较高。



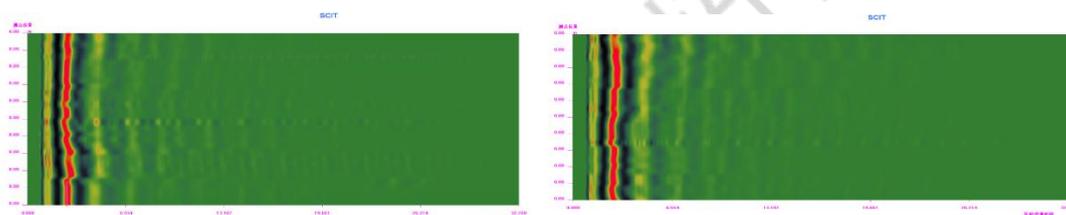
超车道 左：基本密实； 右：1、3 脱空



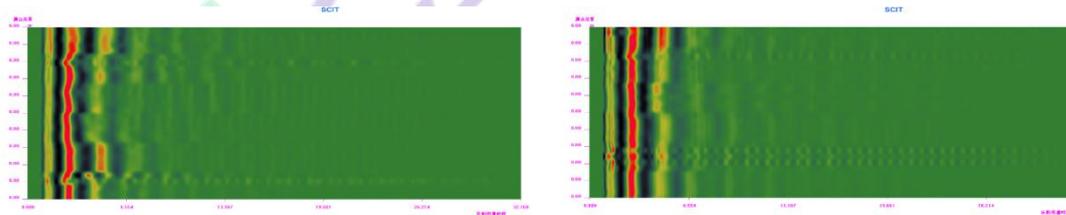
超车道 左：基本密实； 右：1、3 脱空

3) 行车道测试结果

行车道 5 个测点位置间断的出现脱空情况。因行车道正中间未封路，标定位置选的超车道中间位置，可能造成结果偏差。



基本密实



1、5 存在脱空

4.4.6 隧道衬砌仰拱脱空检测（重庆、2022.06）

我公司技术人员于 2022 年 6 月 2 日，在渝黔铁路某隧道进口进行了弹性波雷达隧道仰拱测试试验，总共测试 11 条测线。

现场测线采用平行左侧边沟布置，前 3 条都是单侧线，距左侧边沟 110cm，后 4 条都是双侧线，分别距左侧边沟 110cm、250cm。测点间距约 50cm。



检测场所及情景

根据测试结果判识两处缺陷，进行了取芯验证。取芯结果表明，两处均在深度 150~160cm 处，混凝土与基岩的接触面存在虚渣，亦即存在脱空。

第 5 章 BQIM 管理机能

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：GPS 机能、远程无线传送、数据库机能检测信息可视化机能。

详细资料可参阅“SCIT-1-TEC-12-2017-工程质量及健康信息模型系统 (BQIM)”。

数据库网站网址：www.scitdbc.com

结语与致谢

我们潜心多年研制的相关设备，可以对混凝土结构中的各类剥离和脱空进行综合无损检测。经过大量的现场验证，其测试精度、测试效率、适用范围等均可满足工程要求，对保证工程质量具有非常积极的意义。自 2011 年初推向市场以来，已在数十个工程中得到了应用。

在此，我们衷心期望这些技术、方法和设备能够为我国的工程建设贡献自己的力量，同时也期待着在实际应用中不断地完善和成熟。

最后，衷心向各位合作伙伴以及为本文提供了宝贵资料以及关心、支持我们的各位朋友表示诚挚的谢意！

技术支持

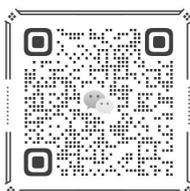
- ✓ 本资料为内部资料，仅供本公司及相关单位人员参考。未经本公司许可，任何单位和个人不能下载、阅读以及转载；
- ✓ 有关本资料相关的任何疑问，请咨询：
 - ✘ 四川升拓检测技术股份有限公司 客服咨询专线
 - ✘ TEL: (028)6861-1507、6861-1511、6861-1527
 - ✘ MAIL: Support@scentralit.com
 - ✘ HTTP: www.scentralit.com
- ✓ 有关本资料的最新更新，可查阅本公司官方网站的下载中心：
http://www.scentralit.com/download_201003181343459218.html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

升拓检测媒体矩阵 | 扫码识别即可进入

升拓检测官网



升拓官方公众号



抖音平台官网号



哔哩哔哩官网号



*抖音和淘宝请分别使用对应软件扫码