

孔道灌浆密实度检测技术体系

(V2.44)



2012-07-15 初稿

2022-06-01 第 80 次修订

2023-04-18 第 81 次修订

2023-10-05 第 82 次修订

四川升拓检测技术股份有限公司

www.scentralit.com

目录

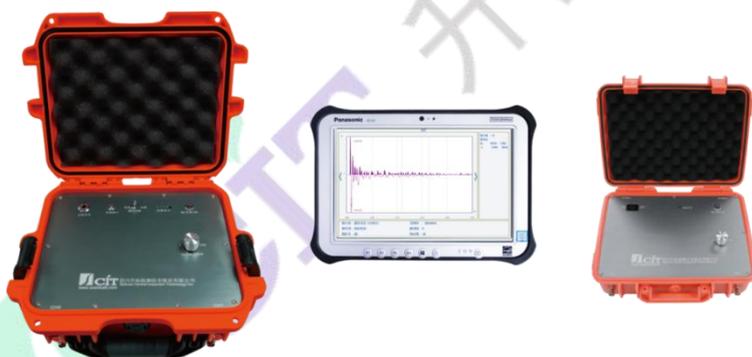
第 1 章 概述.....	3
第 2 章 纵向预应力孔道灌浆密实度检测.....	3
2.1 测试的意义和技术现状.....	3
2.1.1 灌浆不密实的危害.....	3
2.1.2 灌浆不密实的分级.....	4
2.1.3 检测技术现状.....	4
2.1.4 检测要求.....	4
2.2 测试方法和原理.....	5
2.2.1 定性测试.....	5
2.2.2 定位测试.....	6
2.2.3 定位测试中频谱分析方法的优化.....	7
2.2.4 定位测试中缺陷识别的量化.....	7
2.2.5 缺陷类型及规模的识别.....	8
2.2.6 波纹管材质的影响.....	8
2.2.7 灌浆质量的评价.....	8
2.2.8 灌浆质量的检测、评价流程.....	9
2.3 模型试验验证.....	9
2.3.1 模型梁（云南某高速，2014.04）.....	9
2.3.2 厚壁灌浆试验验证（公司模型、2021.05）.....	10
2.3.3 模型试验验证（AI 连采及使用耦合剂、成都、2021.06）.....	10
2.3.4 IE 与 IAE 法对比试验验证（安徽合肥、2020.12~2021.04）.....	11
2.4 定位检测现场验证（新建预制梁）.....	13
2.4.1 T 梁腹板马蹄形部位验证（江西某地、2016.04）.....	13
2.4.2 小箱梁顶板（重庆、2019.11）.....	13
2.4.3 预制梁灌浆缺陷验证（湖南 GX 高速，2021.05）.....	14
2.4.4 孔道灌浆密实度检测演示（湖北武汉某梁场、2022.01）.....	15
2.5 定位检测现场验证例（新建现浇梁）.....	16
2.5.1 灌浆管堵塞位置检测（山东济南，2015.11）.....	16
2.5.2 铁路连续现浇梁验证（湖南，2017.03）.....	17
2.6 定位检测现场验证例（在役桥梁）.....	18
2.6.1 连续刚构桥底板（广东，2016.06）.....	18
2.6.2 预制梁腹板（杭州、2019.08）.....	19
2.6.3 现浇梁底板（四川绵阳、2021.12）.....	20
2.7 定性及端头（喇叭口内）缺陷检测现场验证例.....	20
2.7.1 预应力梁灌浆缺陷验证（湖南平益高速，2020.03）.....	20
2.8 测试特点、适用范围及测试方法最优化.....	21
2.8.1 特点.....	21
2.8.2 适用范围.....	21
2.8.3 影响因素（定性检测）.....	21
2.8.4 影响因素（定位检测）.....	22
2.8.5 测试方法最优化.....	22
2.8.6 解析及判定的标准化.....	22

2.9 验证方法及注意事项	22
2.9.1 灌浆质量缺陷的表象	22
2.9.2 主要验证方法	22
2.9.3 验证的局限及注意事项	23
2.9.4 对检测及评价结果出现争议时的处理	23
第 3 章 横（竖）向预应力孔道灌浆密实度检测	23
3.1 测试的意义	23
3.2 测试方法和原理	24
3.2.1 测试方法的理论基础	24
3.3 试验验证	24
3.3.1 精轧螺纹钢灌浆现场 IAE/超声阵列对比试验（贵州凯里，2021.08）	24
第 4 章 孔道定位	25
4.1 测试的意义	25
4.2 孔道定位	26
4.2.1 模型孔道位置定位验证检测（郑州某环线道路、2018.11）	26
4.2.2 刚构桥腹板（贵州，2021.08）	26
第 5 章 AI 辅助检测、BQIM 及新一代检测技术	27
5.1 概述	27
5.2 AI 辅助检测	27
5.2.1 预应力孔道灌浆定位检测 AI 分析模型及数据	27
5.2.2 预应力孔道灌浆定位检测 AI 分析精度	28
5.2.3 AI 预测验证例（2018.06，马尔代夫）	28
5.3 新一代无损检测技术 IAE	28
5.3.1 IAE 概述	28
5.3.2 密实与孔道区别及纵向孔道定位测试（云南、2019.07）	29
5.3.3 现场孔道灌浆密实度检测（云南、2019.07）	30
5.3.4 IAE 测灌浆密实度现场验证（贵州都匀、2020.05）	30
结语与致谢	31
技术支持	1

第 1 章 概述

在后张法预应力混凝土梁的制作中，管道灌浆的密实度的质量保证是非常重要的。否则，会加速结构的劣化和降低结构承载力，严重时甚至造成安全隐患和垮桥等恶性事故，带来巨大的社会经济损失。此外，在建筑行业中，装配式混凝土结构的应用也在日益广泛，其中的钢筋套筒连接，以及浆锚搭接连接的灌浆密实度也直接影响到结构的承载力。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这两项关键问题的解决方案和技术体系。该体系基于无损检测技术，具有测试效率高、可靠性好、对结构无损伤等特点，可以大大地提高预应力梁的质量保证度。

该技术体系的检测内容主要包括：孔道灌浆密实度（定性、定位）；混凝土浇筑质量（构件、试件的强度及刚度）。整个技术体系采用冲击弹性波作为测试媒介，并集成到一套测试设备中（预应力混凝土梁多功能检测仪，SPC-MATS）。其测试精度和效率达到工程要求，已在国内外上百个桥梁工程中得到了实际应用。此外，有关锚固应力、尺寸及内部缺陷也可无损检测。我们具有相关技术的全部知识产权，并申请和获得了多项国家发明专利，产品出口到日本等海外。其中，灌浆密实度检测技术获 2011 年公路学会科技进步三等奖、2012 年中国市政学会科技进步二等奖。



预应力混凝土梁多功能检测仪（SPC-MATS）

第 2 章 纵向预应力孔道灌浆密实度检测

2.1 测试的意义和技术现状

2.1.1 灌浆不密实的危害

预应力钢绞线要在桥梁使用过程中确保长期发挥作用，达到设计要求，孔道压浆的质量效果是重要的影响因素之一。预应力孔道灌浆的目的主要有两个。一是排除孔道内

的水和空气，防止预应力钢绞线被腐蚀，保证构件的耐久性；二是通过灌浆体使得钢绞线与周围混凝土形成一个整体，改善应力分布和提高构件的承载力。如果压浆不密实，水和空气的进入使得处于高度张拉状态的钢绞线材料易发生腐蚀，造成有效预应力降低。严重时，钢绞线会发生断裂，从而极大地影响桥梁的耐久性、安全性。此外，压浆质量缺陷还会导致混凝土应力集中，进而改变梁体的设计受力状态，从而影响桥梁的承载力和使用寿命。

2.1.2 灌浆不密实的分级

结合国外经验与叶见曙、张峰^[7]提出的灌浆密实度的分级标准，根据对钢绞线的危害程度，可将灌浆密实度分为如下4级：

A级：注浆饱满或波纹管上部有小蜂窝状气泡、浆体收缩等，与钢绞线不接触；

B级：波纹管上部有空隙，与钢绞线不接触；

C级：波纹管上部有空隙，与钢绞线相接触；

D级：波纹管上部无砂浆，与钢绞线相接触并严重缺少砂浆。D级又可细分为D1、D2和D3级，分别对应于大半空、接近全空和全空

其中，C级和D级对钢绞线的危害很大。而A、B级尽管对钢绞线的锈蚀影响较小，但会对应力传递和分布产生不利影响。另一方面，在实际的检测中，由于检测技术的限制，对A、B、C级的明确区分尚有一定的难度。

2.1.3 检测技术现状

长期以来，研究人员开发了多种方法。按测试所采用的媒介来分，大致可以分为：基于电磁波的检测方法（如电磁雷达）；基于超声波的检测方法；基于放射线（X光、伽马射线、铯192等）的检测方法；基于冲击弹性波的检测方法。

基于冲击弹性波的检测方法被认为是最有前途的方法，可分为两类：

- (1) 定性检测：基于孔道两端穿透的方法；
- (2) 定位检测：基于反射的冲击回波法（IE）

2.1.4 检测要求

我国早在1991年的“公路桥梁养护管理工作制度”中即规定，在“特殊检查项目”中，要求“③预应力钢筋现状及灌浆管道状况、空隙情况调查；”（第二十四条）。

近年来，对灌浆密实度的检测得到了广泛的重视。2012年6月，陕西省交通运输厅在“陕西省公路建设工程质量工作指导意见”中明确指出，“孔道压浆后须经有资质和检测经验的单位进行压浆效果检测，检测频率可按预制梁数量的1%进行抽检，现浇梁、

刚构悬浇梁段按波纹管总数的 1%进行抽检。”。2013 年 1 月，浙江省交通运输厅在“浙江省公路工程竣（交）工验收实施细则（试行）”中，将压浆密实度列入抽查项目，且比例不低于构件或预应力束的 3%。到 2020 年不完全统计，全国已有 20 多个省市自治区要求检测灌浆密实度。

2.2 测试方法和原理

为了准确测试纵向预应力梁管道（双端锚头露出）的灌浆缺陷，同时兼顾测试效率，因此我们开发了基于冲击弹性波的多种方法：定性检测；定位检测。

灌浆密实度测试方法一览表

方法		测试方案	备注
定性 测试	全长衰减法（FLEA）	在锚索两端上激振与受信	对预应力孔道全体进行定性测试。
	全长波速法（FLPV）		
	传递函数法（PFTF）		确定锚头附近（约 0.5~2m）范围内有无缺陷
	波形特征对比法		
定位 类型 测试	冲击回波等效波速法（IEEA）	在每个管道上沿间距为 0.2m 进行测试，孔道正上方激振。	定位测试，确定缺陷的具体位置
	共振偏移法（IERS）		

2.2.1 定性测试

1) 全体灌浆性能

采用全长衰减法（FLEA）和全长波速法（FLPV）进行测试。

(1) 全长衰减法（FLEA）

如果孔道灌浆密实度较高，能量在传播过程中逸散的越多，衰减大，振幅比小。反之，若孔道灌浆密实度较低，则能量在传播过程逸散较少，衰减小、振幅比大。

因此，通过精密地测试能量的衰减，既可以推测灌浆质量。我们研发的双方向激振技术（已取得国家发明专利，专利号：ZL200510021851.5）可以大幅提高能量衰减的测试精度，从而奠定了全长衰减法的基础。

(2) 全长波速法（FLPV）

通过测试弹性波经过锚索的传播时间，并结合锚索的距离计算出弹性波经过锚索的波速。通过波速的变化来判断预应力管道灌浆密实度情况。一般情况下波速与灌浆密实度有相关性，随着灌浆密实度增加波速是逐渐减小，当灌浆密实度达到 100%时，测试的锚索的 P 波波速接近混凝土中的 P 波波速。

2) 端部灌浆性能

主要采用传递函数法（PFTF）和波形特征对比法测试。

(1) 传递函数法（PFTF）

在孔道的一端钢绞线上激振另一端接收时，如果端头附近存在不密实情况，会使振动的频率发生变化。因此，通过对比接收信号与激发信号相关部分的频率变化，可以判定锚头两端附近的缺陷情况。

(2) 波形特征对比法

在预应力孔道端部存在不密实区域时，接受到弹性波首先为经钢绞线传来的信号，然后接收到经周围混凝土传来的信号，两者之间有一定的时间差。另一方面，端部灌浆密实时，两者信号较为接近，不易分辨。

3) 量化分析（灌浆指数）

上述各定性测试方法各有特色，尽管测试原理不同，但测试方法完全一样。因此，根据一次的测试数据可以同时得到 3 种方法的测试结果。

灌浆密实度定性测试方法比较

方法	优点	缺点
全长衰减法（FLEA）	测试原理明确、对灌浆缺陷较为敏感	测试结果离散性较大，影响因素多
全长波速法（FLPV）	测试结果较为稳定，适合测试大范围缺陷	测试原理不严密，对缺陷较为钝感
传递函数法（PFTF）	能够测试锚头附近的灌浆缺陷，解析方便	测试范围较小

2.2.2 定位测试

1) 概述

本体系基于冲击回波法（IE 法），通过侧壁或者顶（底）面激振、接受的方式，对灌浆缺陷的位置、规模等进行定位测试。然而，通常的冲击回波法在检测灌浆密实度时存在严重的不足，因此，我们进行了大幅的改进和扩展，开发了下列成套方法：改进 IE 法，通过改进频谱分析方法，提高了分辨力；冲击回波等效波速法（IEEV）；冲击回波共振偏移法（IERS）。

2) 基本原理概述

- (1) 根据在波纹管位置反射信号的有无以及梁底端的反射时间的长短，即可判定灌浆缺陷的有无和类型。

3) 等效波速法 (IEEV)

经实践证明, 等效波速法是非常有效的方法。该方法包括两个部分, 即:

- (1) 当存在灌浆缺陷时, 弹性波波线 (或部分) 传播距离增加, 时间延长;
- (2) 采用基于相关分析为基础的频谱分析方法可以敏感地反映该时间的变化;

4) 共振偏移法 (IERS)

对于通常的预应力混凝土梁 (C50), 各激振锤得到的弹性波自振周期大约为:

典型条件下弹性波的自振周期 (ms)

激振锤	D6	D10	D17	D30	D50
自振周期 (ms)	0.021	0.034	0.058	0.103	0.172
对应反射深度 (m)	0.041	0.069	0.117	0.206	0.344

因此, 在孔道上面测得的自振周期与灌浆密实部位或混凝土中测得的自振周期有所变化, 且其对应反射深度与孔道埋深接近时, 表明孔道灌浆有缺陷。

5) 测试方法的选择

上述三种方法均采用同一数据和同一频谱分析, 仅在云图判读上有所不同。一般而言, IE 法是基础, 各种状况均适用。IEEV 法适合于壁厚较小, 底部反射明显的情形。而 IERS 法则相反, 适合于壁厚较大, 底部反射不明显的情形。

6) 定位测试的特点: IEEV 法测试精度高, 但相对速度较慢; 测试精度与壁厚/孔径比 (D/Φ) 有关, D/Φ 越小, 测试精度越高; 当边界条件复杂 (拐角处) 或测试面有斜角 (如底部有马蹄时), 测试精度会受较大的影响。对于孔道两端, 锚垫板喇叭口内的灌浆质量, 由于该区域钢筋密集, 且有喇叭口的影响, 因此对定位检测的精度影响很大。此时, 需要用传递函数法 (PFTF) 进行测试。

2.2.3 定位测试中频谱分析方法的优化

在 IEEV 法中, 精确地确定反射时间对于检测的分辨力有着非常重要的意义。由于测试距离较短, 一般无法在时域上确定, 所以采用频谱分析的方法是必不可少的。

2.2.4 定位测试中缺陷识别的定量化

采用 β 值和 SPS 值来反映测点位置的灌浆质量。

- 1) β 值 (测点灌浆密实度指数)
- 2) PSG 和 SPS 指标
- 3) 分析实例

下图是典型的 PVC 空管和灌浆密实管的定量分析结果。

2.2.5 缺陷类型及规模的识别

研究表明，不同类型和不同规模的缺陷对结构耐久性和整体性的影响是不同的：

- (1) 疏松型缺陷对结构的耐久性和整体性的影响相对较小。但是，当缺陷处材质强度降低较大，对钢绞线的保护性能严重低下时，其对结构的不利影响接近于空洞型缺陷；
- (2) 当空洞型灌浆缺陷与钢绞线相接触时，其对钢绞线的锈蚀的影响将急剧增加；
- (3) 当空洞型灌浆缺陷接近于全空时，不仅会严重影响钢绞线的耐久性，而且对结构的整体性等多个方面都会产生不利影响。

因此，将空洞型缺陷是否与钢绞线相接触，以及其是否接近全空作为缺陷的分级是恰当的。对于通常的孔道施工，钢绞线的横截面积约为孔道横截面积的 30%左右。考虑到形状因素，在钢绞线居中的情况下，经计算，钢绞线与管壁的距离约为管道内径的 0.2 倍左右，亦即 1.4~1.8cm。该规模的缺陷，对于侧方向定位检测，恰好能被检出；而对于上下方向的检测，由于缺陷通常位于管道的上方，其投影宽度约为管道内径的 0.8 倍，容易被检出。

2.2.6 波纹管材质的影响

在交通工程中，孔道主要采用 2 类波纹管，即铁皮和 PVC 波纹管。尽管 PVC 波纹管在与混凝土间粘结性能等方面要低于铁皮波纹管^[7]，但由于其施工方便因而也得到了广泛的应用。由于阻抗的关系，两类波纹管对弹性波的反射不同，从而对灌浆密实度缺陷的检测也有一定的影响。

2.2.7 灌浆质量的评价

如上所述，对于孔道灌浆的质量评价可以有两种方法：利用综合定性灌浆指数 I_f ；利用定位测试中缺陷的比例，即灌浆密实度指数。

(孔道) 灌浆密实度评价方法及比较

评价方法	综合灌浆指数 I_f	灌浆密实度指数 D
指标	✓ ≥ 0.80 : 无灌浆事故或大规模缺陷 ✓ < 0.80 : 无灌浆事故或大规模缺陷	✓ 0.95 以上为良好 (I 类) ✓ 0.90~0.95 为较好 (II 类) ✓ < 0.90 为较差 (III 类)
优点	✓ 测试快捷	✓ 物理意义鲜明

<p>缺点</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 物理意义不鲜明 ✓ 在 0.8~0.95 之间的数值多,对灌浆密实度的判别较钝感 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 测试耗时较长 ✓ 若仅测试孔道部分长度,则代表性不强
-----------	---	---

2.2.8 灌浆质量的检测、评价流程

在灌浆密实度检测时,应遵循以下原则:

- (1) 对于顶板、底部、空心板、先剪后连位置时,尽可能采用垂直检测的方式;
- (2) 对于腹板等垂直结构,采用水平检测的方式;
- (3) 在腹板下部马蹄形部位,以及有多根孔道时,可采用从下向上检测的方式;
- (4) 定性检测一般用于事故排查,尽可能优先采用定位检测方式。

2.3 模型试验验证

2.3.1 模型梁(云南某高速,2014.04)

我们与云南某高速公路工程咨询有限公司合作,共同对厚壁预应力孔道的灌浆密实度进行了检测验证。试验对象为6m混凝土梁2片。一片梁内预埋金属波纹管9根,另一片梁内预埋塑料波纹管9根,波纹管内缺陷有全部空腔、部分空腔。其中,特别对钢筋的影响进行了分析和研究。

考虑到位置关系,对于1~3孔道,采用自上而下测试。4~6孔道,则采用侧面测试。由于测试位置关系,7~9孔道本次未加测试。



模型及测试情景

1) 钻孔验证

对于测试结果与设计缺陷吻合较差的铁皮4#、6#波纹管,以及随机挑选的塑料1#和6#波纹管进行了钻孔验证,可以看出,钻孔验证结果与测试值一致。

2) 小结

- (1) 因壁厚较厚，难以获取梁底反射信号，因此采用共振偏移法，效果较好；
- (2) 钢筋的影响总体较小。

2.3.2 厚壁灌浆试验验证（公司模型、2021.05）

1) 概述

采用新加工激振锤对四川交院老基地模型进行厚壁灌浆缺陷测试，被测模型的厚度分别为 80cm、100cm。



现场测试照片（左侧为 A 模型，右侧为 B 模型）

2) 现场测试

本次现场使用多种激振工具进行敲击，激振锤分别：1#(Φ16L300)、2#(Φ16L400)、3#(Φ16L500)、4#(Φ18L300)、5#(Φ18L400)、6#(Φ18L500)、7#(Φ20L300)、8#(Φ20L400)、9#(Φ20L500)。传感器为带支座的 S31SC，敲击点到传感器距离约 0.1m。

模型信息

模型	厚度	孔道埋深	孔道直径	测试长度（孔道长度）
A	80cm	0.14m	80mm	60cm
B	100cm	0.45m	100mm	60cm

3) 试验结果

根据测试结果，可以看出，钢筋锤诱发的长波长弹性波对厚壁灌浆的测试效果较好。

2.3.3 模型试验验证（AI 连采及使用耦合剂、成都、2021.06）

1) 概述

受邀对某预制模型的孔道灌浆进行再次测试。设计强度为 C30，采用人工搅拌混凝土

土，共 6 个模型，每个模型分别设计两个孔道，分别为金属波纹管 and 塑料波纹管。模型长 1.6m，宽高在 0.18~0.65m。

由于浇筑质量整体不理想，且表面平整度较差，因此，在本次试验中测点涂抹少量耦合剂。结果表明，耦合剂可大幅改良信号的品质。另一方面，本次试验采用了 AI 自动连采技术，测点间距缩小为 5cm。

2) 典型测试结果

如下图所示。

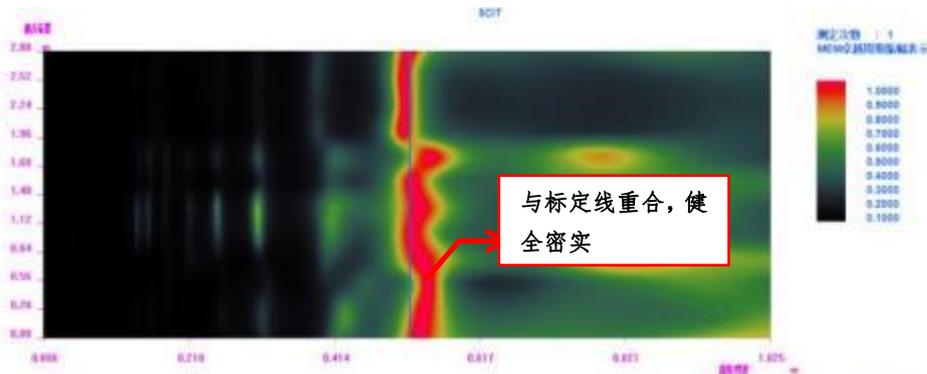


图 2-3-26 健全部位的实测示例图

3) 小结

- (1) AI 连采技术（基于人工智能的有效信号识别技术）可大大提高了检测效率，可实现对预应力孔道精细快速检测；
- (2) 对于波纹管材质，测试信号及判断基准没有明显差异；
- (3) 孔道距离测试面越浅，缺陷孔道底部反射时间的滞后程度越明显；
- (4) 对于浇筑质量差的模型，适当涂抹耦合剂对提高信号质量有明显效果。

2.3.4 IE 与 IAE 法对比试验验证（安徽合肥、2020.12~2021.04）

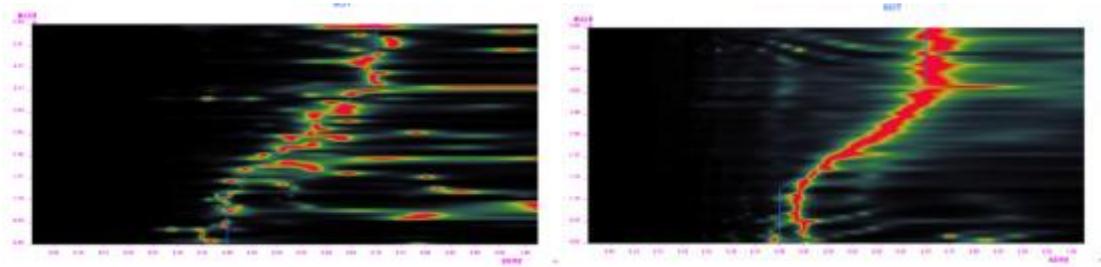
1) 概述

与中铁四局检测中心合作，对典型铁路梁模型的预应力孔道灌浆密实度进行了 IE 和 IAE 的对比检测及验证。

模型梁尺寸设计为宽（40-70）cm*长 600cm*高 180cm，分设等厚段、渐变段，设有密实段、全空段、局部空段和疏松段，混凝土强度等级为 C50。共设置了 8 类 21 段缺陷。

2) IE 与 IAE 的对比

分别利用 IE 和 IAE 法对模型梁的同一孔道分别进行测试。检测后分析结果如下：

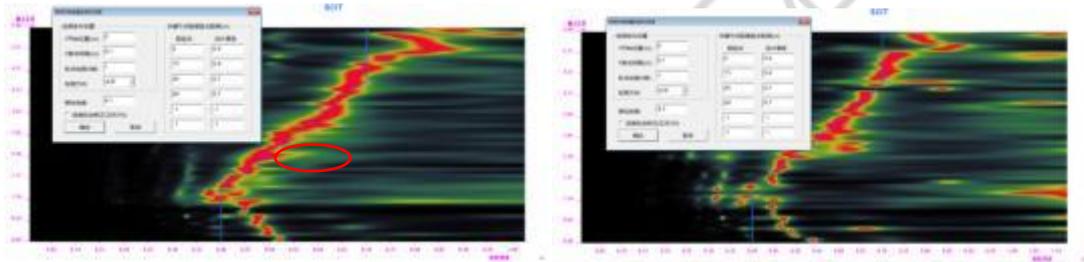


IE 法与 IAE 法检测结果图

可见，IAE 法的频谱其梁底部反射信号更为集中，能更加清晰地看出梁体厚度的渐变，更加易于判断。且 IAE 法的检测效率更高，约为传感器的四倍。

3) 混凝土龄期对灌浆密实度定位检测的影响

由于模型梁的 N1 孔道中间段落为纯混凝土，因此可以用于标定，在其不同的龄期进行测试，通过波速使得 N1 孔道中间段的检测厚度与实际厚度吻合，便可测试得到不同龄期的混凝土波速。测试结果如下所示：



龄期 3 天（波速 4.1Km/s） 右：龄期 28 天（波速 4.5Km/s）

可见，混凝土龄期 3 天与龄期 28 天的测试图形基本一致，但弹性波速度区别较大。

4) IAE 在灌浆密实度检测中的准确度及分辨力

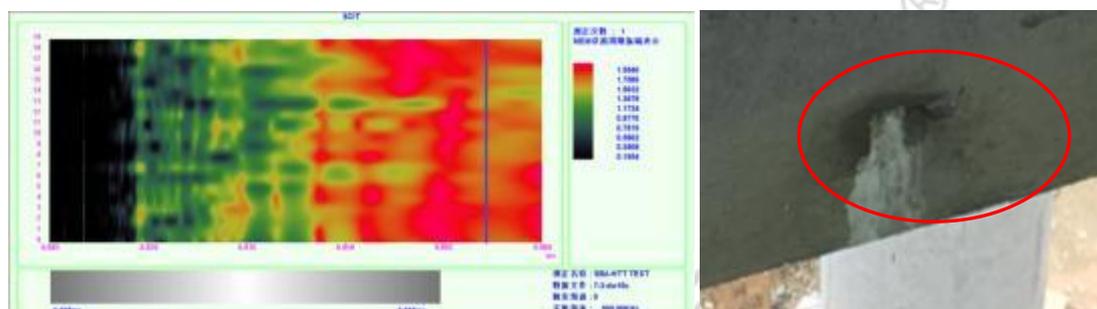
试验结果表明：

- (1) 预设的 21 个缺陷全部检出，其中有两个缺陷的检出范围与设计出入较大。因此可以得到声频设备对灌浆密实度定位检测的准确率达 91%。
- (2) 全空孔道与部分空的孔道的延后有一定的区别，可以根据这一特点来初步判别缺陷的类型（部分空、全空）。
- (3) 在对双排孔道检测时，双排孔道的缺陷在相同位置会产生叠加。

2.4 定位检测现场验证（新建预制梁）

2.4.1 T 梁腹板马蹄形部位验证（江西某地、2016.04）

T 梁的马蹄形部位是灌浆密实度检测中较为困难的部分，为此，我们在江西省内某梁场进行了测试验证。对象为 5 片 30m 预制 T 梁组成，测试部位为中部马蹄部位。测试采用 D17 和专用传感器支座 ST21C，由于孔道位置距表面较近（5cm），因此采用共振偏移法进行分析。结果显示 5 片 T 梁测试部位有 2 孔道存在严重缺陷，有 3 孔道存在局部缺陷，通过现场钻孔及现场相关现场人员确认，测试结果与实际情况基本一致。



孔道测试云图及现场钻孔结果

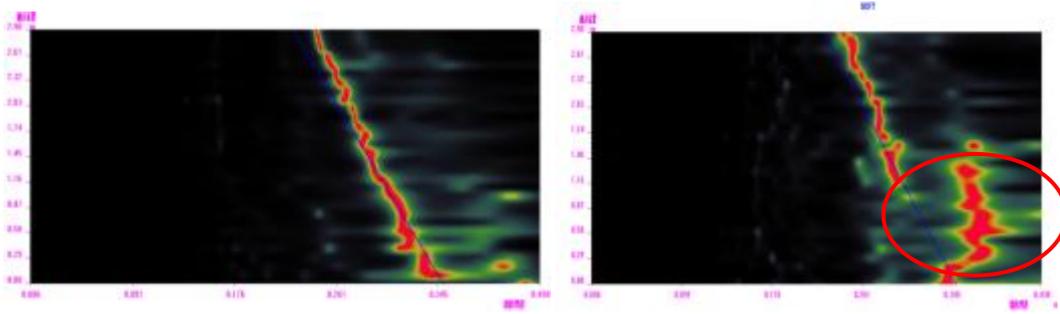
2.4.2 小箱梁顶板（重庆、2019.11）

应重庆交大检测有限公司邀请，对重庆某公路工程(二期)项目某梁进行孔道灌浆密实度测试。由于前期对重庆某公路工程(二期)项目现场排查发现顶板存在孔道灌浆缺陷，此次为对指定梁体进行问题排查，该梁型为 30 米小箱梁，腹板厚度为 18cm 渐变至 30cm，本次测试采用灌浆密实度定位检测，现场检测如下图。

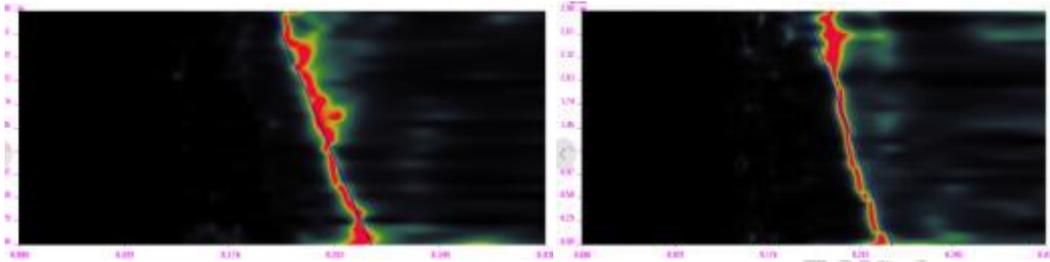


现场测试及问题顶板孔道

为了更准确的测试孔道缺陷，测点布置为 0.1m，激振及信号拾取装置采用 PB17+S21SC，下为实测等值线图形。



小里程右端 N1 孔道等值线图（左：标定 右：测试孔道）



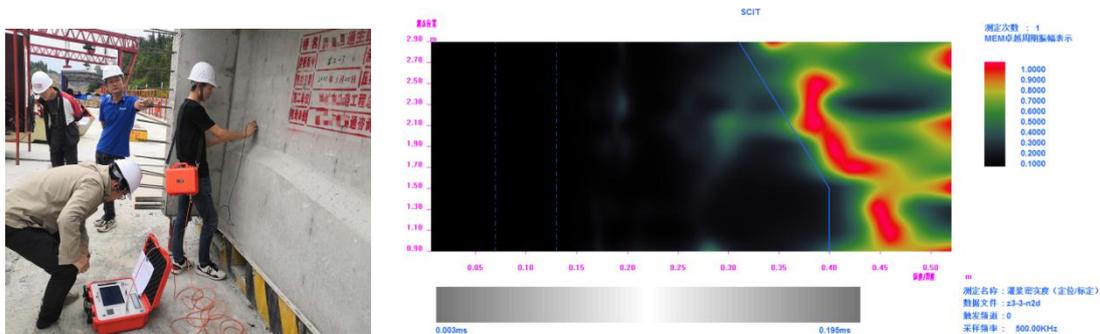
大里程右端 N1 孔道等值线图（左：标定右：测试孔道）

测试结果显示小里程右端 N1 孔道最高位置处存在明显延迟，由此判断该孔道内部无灌浆料或仅少量灌浆料。为验证结果准确性，现场随即对其孔道从端头进行了插入钢丝验证，验证情况如下：

- (1) 现场小里程右端 N1 孔道可直接插入钢丝约 60cm；
- (2) 现场采用矿泉水对该孔道进行了灌水验证，可灌入的水大部分均直接流入孔道，未溢出；可见判定结果与测试结果基本相符；

2.4.3 预制梁灌浆缺陷验证（湖南 GX 高速，2021.05）

受湖南省交通科学研究院委托，我公司技术人员对湖南 GX 高速桥梁的孔道压浆密实度进行检测。被测 T 梁长度为 30m，箱梁设计强度等级为 C50，腹板端头厚度为 0.4m，中间厚度为 0.2m。



现场检测图、检测结果图

预应力梁灌浆密实度检测技术体系

检测结果显示从端头 0.9m~1.7m 范围内出现明显缺陷。现场对判断缺陷的区域进行打孔验证。结果表明，孔内浆料明显潮湿、，可能浆料配比等出现问题导致强度明显偏低的情况。



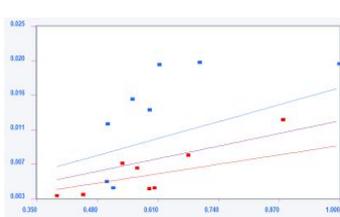
现场打孔场景及孔内情况

2.4.4 孔道灌浆密实度检测演示（湖北武汉某梁场、2022.01）

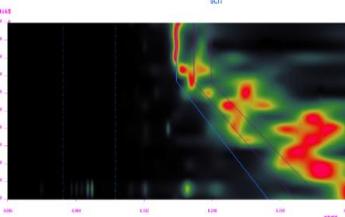
受武汉相关单位的委托，对武汉市某预制梁现场进行了孔道压浆密实度质量检测，根据现场对其指定梁体共 6 个孔道压浆密实度质量进行了检测，现场检测场景请参图 2-4-53，其中一个孔道压浆密实度质量存在明显问题，相关检测结果请参考下图。



现场检测场景



定性检测结果



定位结果图



现场验证

检测结果表明：

- 1) 其中一个孔道定性指数较低，进行定位复检，定位检测结果局部有不同程度滞

后现象，判定为灌浆不密实。

2) 检测结果与现场开孔验证情况相符。

2.5 定位检测现场验证例（新建现浇梁）

2.5.1 灌浆管堵塞位置检测（山东济南，2015.11）

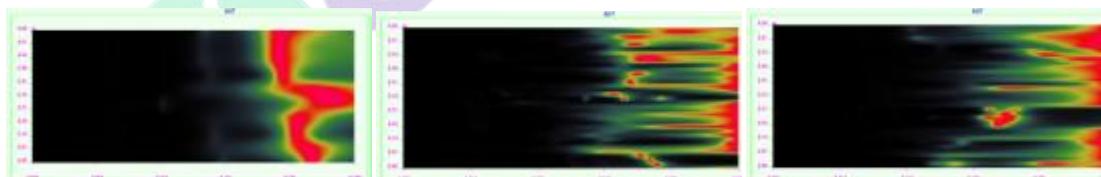
山东济南境内某在建高速现浇梁在灌浆过程中发现 6 根横向束孔道存在堵管现象，导致该部分孔道仅注入少量灌浆料。应相关单位邀请，我公司检测人员受该项目施工单位及监理单位邀请找出孔道堵管位置。被测试孔道为横向束孔道，位于现浇梁中部，N2、N3 孔道为并排波纹管且孔道位置处混凝土结构厚度变化复杂，能够测试孔道位置长度有限；在测试过程中，采用共振偏移法（IERS），在测试过程中针对不同厚度选用不同厚度激振锤对孔道进行定位测试。测试等值线图如下：



N1 堵管孔道最高位置等值线图（左：标定，中：测试孔道，右：测试孔道）



N2 堵管孔道最低位置等值线图（左：标定，中：测试孔道，右：测试孔道）



N3 堵管孔道最低位置等值线图（左：标定，中：测试孔道，右：测试孔道）

测试结果显示部分孔道最高位置处部分有少量浆料，部分无浆料（由此判断该位置为孔道堵管位置）如图 2-5-14；部分孔道最低位置处无灌浆料（由此判断该孔道内部无灌浆料或仅少量灌浆料）如下图；为验证结果准确性，现场随即对其进行钻孔验证；验证结果显示部分孔道确系无灌浆料，测试判断堵管位置处由于波纹管变形固不能注入多余灌浆料。实际钻孔结果与测试结果基本符合。



波纹管位置设计图、对测试孔道进行打气、注水验证

2.5.2 铁路连续现浇梁验证（湖南，2017.03）

应相关单位邀请，对湖南省内 3 座在建铁路大桥现浇连续梁进行灌浆密实度缺陷定位检测。测试位置包括底板、顶板和腹板，测试孔道壁厚为 20~30cm，测试采用 17 锤及 S21C 传感器及专用支座。验证采用开孔和内窥镜拍照的方法，共计 6 处。

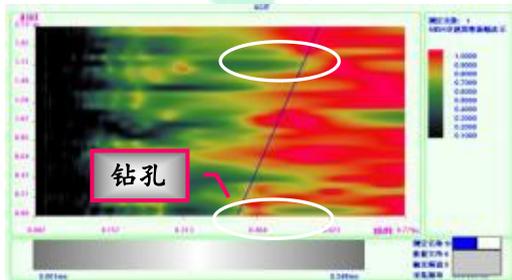
1) 腹板（有严重缺陷）

根据测试结果，凿开封端混凝土，通过灌浆孔用内窥镜能清晰看到钢绞线未被包裹，说明存在严重缺陷。

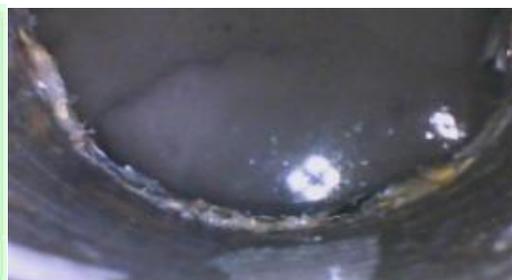


现场检测情景

2) 顶板（无严重缺陷）



定位测试等值线图

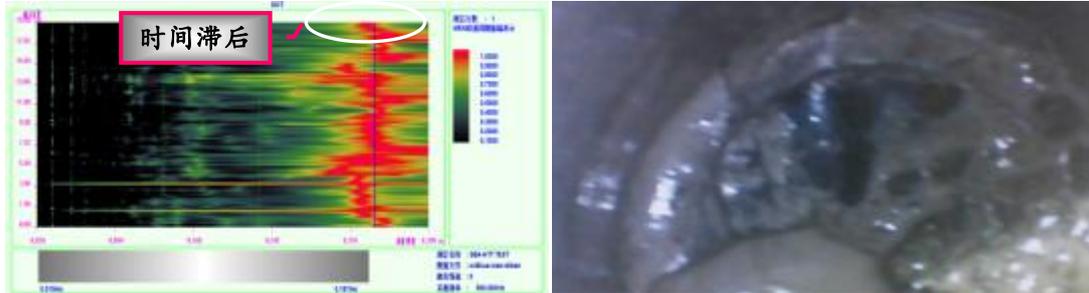


钻孔内窥镜照片

打孔显示孔道内部浆料基本饱满，仅孔道顶板存在微小缺陷，但钢绞线完全包裹。

3) 底板（板厚度超标）

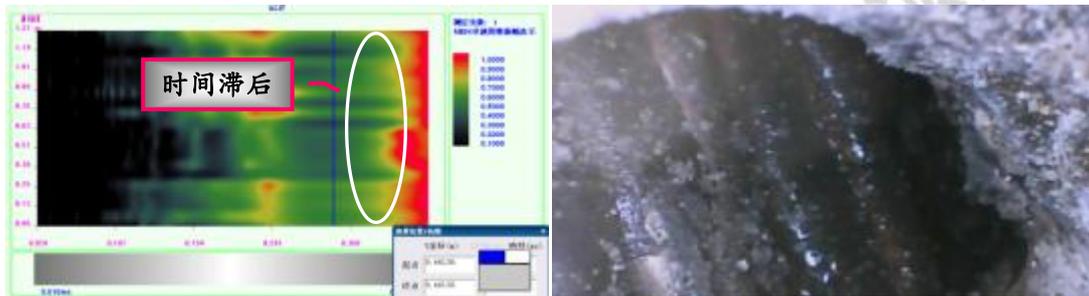
根据测试结果，该当部分反射时间滞后，怀疑为灌浆缺陷。但钻孔后内窥镜观察，该处灌浆密实无任何缺陷。后据检查，该处底板设计厚度 29cm，但部分区域实际厚度到达 36cm，因厚度变化导致信号严重滞后。值得说明的是，厚度严重超标本身也是桥梁施工质量问题。



定位测试等值线图

钻孔内窥镜照片

4) 底板（有严重缺陷）



定位测试等值线图

钻孔内窥镜照片

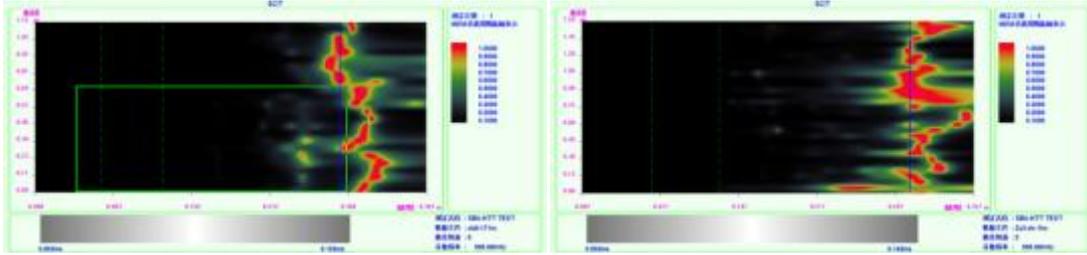
通过内窥镜观察，该处钢绞线线裸露处于无浆料状态。

2.6 定位检测现场验证例（在役桥梁）

2.6.1 连续刚构桥底板（广东，2016.06）

广东某地一座运营的某连续刚构桥，相关单位先对其底板位置管道进行有损检查，发现部分存在灌浆不密实情况，应相关单位邀请，我公司检测人员采用 D17 激振锤和广域信号拾取装置对已经补浆管道和正常管道进行了检测。总共对结构底板的 13 处及腹板的 3 处进行检测。并对底板的 6 处（5 处密实，1 处缺陷）进行开孔验证，并通过内窥镜拍照或注水或穿铁丝的方式验证。经过验证，开孔结果与测试结果完全吻合，得到了相关单位的一致好评。

预应力梁灌浆密实度检测技术体系



左：检测有缺陷孔道，右：检测密实孔道

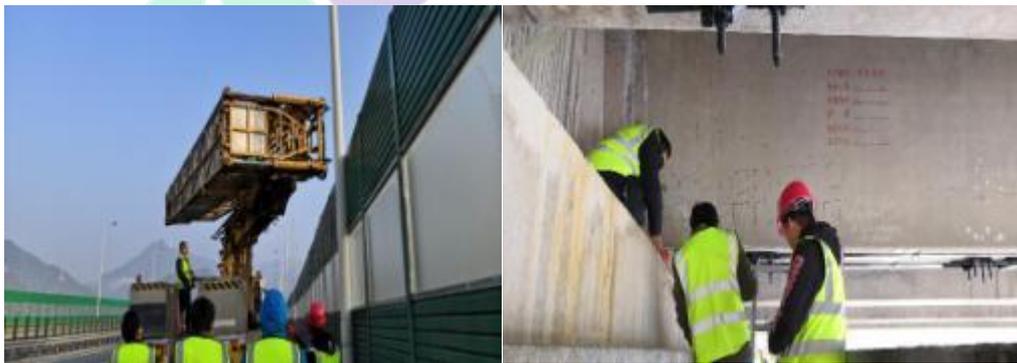


现场注水、穿铁丝及钻孔情景

2.6.2 预制梁腹板（杭州、2019.08）

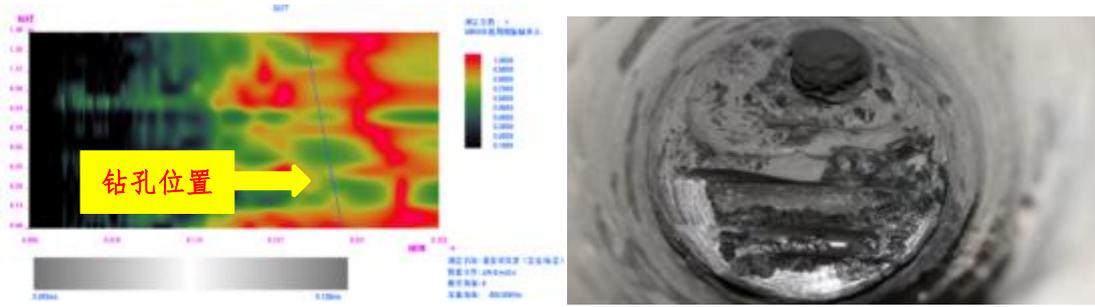
受北京九通衢检测技术股份有限公司邀请，我公司于2019年12月对某运营高速部分桥梁进行了孔道灌浆密实度检测，因被检测梁已架上桥，所以只能使用桥检车在梁外侧进行灌浆定位检测。

本次检测对象为预制箱梁，检测位置为梁两端头0~1.5m范围，检测方向始终由端头向梁中间方向测试，测点的间距布置为0.1m，每点敲击1次，现场检测如下图。



现场照片

经过检测发现测试梁板不同孔道都存在不密实现象，遂对其中某一孔道（YN2）进行钻孔验证，YN2孔道底部反射信号与现场标定线存在明显延迟；且从钻孔照片中不难看出，孔道上部确实存在不密实现象，与测试结果相符。



测试结果图及钻孔验证照片

2.6.3 现浇梁底板（四川绵阳、2021.12）

受中铁某局某工地实验室委托，对京昆高速公路某特大桥的合拢段底板处的9条孔道进行灌浆密实度定位检测。本次检测的9条孔道尚未注浆，检测起因是由于待测孔道内部的钢绞线在张拉过程中，出现伸长量严重偏大的情况，初步怀疑合拢段底板处的孔道在施工过程中出现破损的情况，导致浇筑过程中有混凝土进入孔道，从而影响钢绞线的张拉伸长量。

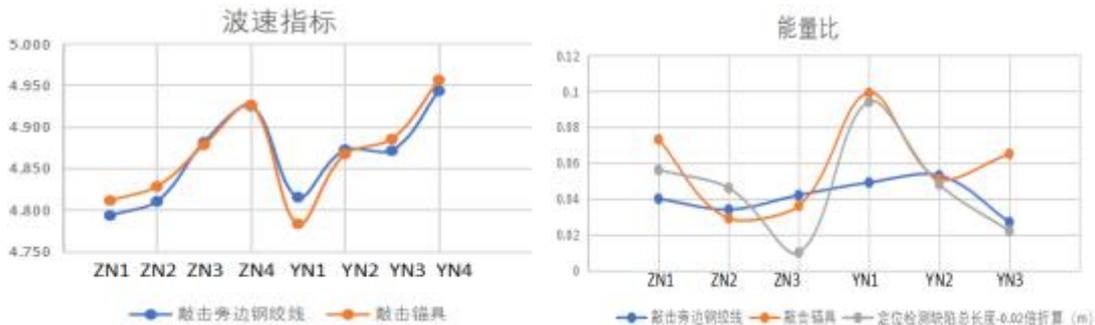
检测目的是为了排查，待测的9条孔道内部是否有混凝土进入。根据检测结果，本次测试的9条孔道内部均未发现有混凝土进入。

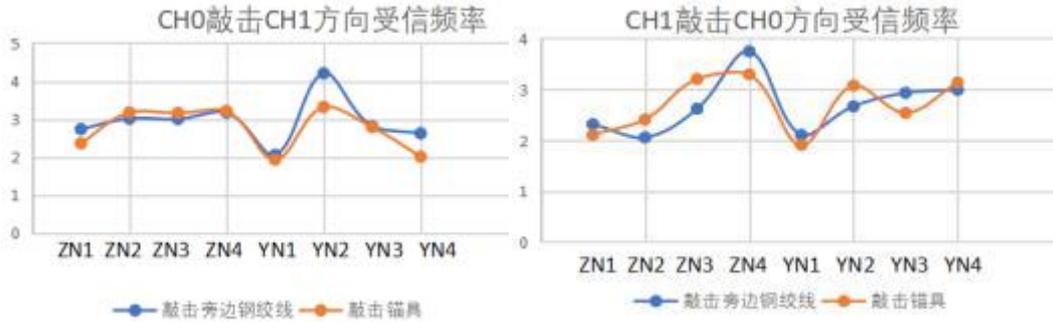
2.7 定性及端头（喇叭口内）缺陷检测现场验证例

2.7.1 预应力梁灌浆缺陷验证（湖南平益高速，2020.03）

应湖南省交通规划勘察设计院有限公司邀请，我公司技术人员前往平益高速，使用孔道灌浆密实度检测仪对1片预制箱梁（设计长度为25m）进行孔道压浆检测，并对缺陷孔道进行开孔验证。

为了确定敲击方式对检测结果的影响，现场定性检测时，分别敲击锚具和附件钢绞线，传感器放置位置为钢绞线位置。





不同敲击部位的定性检测参数趋势分析图

测试及验证结果表明：

- (1) 两种敲击方式（敲击旁边钢绞线及敲击锚具），腹板及底板束的波速指标、孔道受信频率指标趋势基本一致，但修正振幅比指标差异较大；
- (2) 结合经过部分验证的定位缺陷长度分析，修正振幅比指标，敲击锚具的方式更优于敲击钢绞线，且其与定位缺陷长度具有很强的相关性；
- (3) 对灌浆事故的左幅 62-2 梁板的 ZN1 孔道的验证，定性检测可以很好反映。

2.8 测试特点、适用范围及测试方法最优化

2.8.1 特点

集成度高；测试效率和测试精度的平衡；测试精度、客观性高、测试盲区少；可测试缺陷类型；易于标准化。

2.8.2 适用范围

- 1) 锚头尚未封闭的梁场的现浇梁：可以应用上述的各种方法；
- 2) 锚头已封闭的梁；
- 3) 缺陷的检出尺寸：

2.8.3 影响因素（定性检测）

梁的长度在 150m 范围内且锚头尚未封闭的预制梁或现浇梁，可采用定性方法测试灌浆密实度。然而，在定性测试中梁的长度，孔道的位置，钢绞线位置的偏移，灌浆料的龄期，基准波速的确定对测试结果精度有一定的影响。

在定性测试中主要有以下方面的影响因素：梁的长度；钢绞线外露长度影响；钢绞线位置的偏移；灌浆料的龄期；基准波速的确定；孔道的位置。

2.8.4 影响因素（定位检测）

在定位测试中，也会受到结构特性、管道特性、测试作业、分析方法等的影响。

为了达到即快速又可靠地测试，需要传感器既要牢固地与梁体表面接触，又能够方便移动。通过我们长期的研究，建议采用下面两种方法：

- [1] 有经验的测试人员用手将传感器按压在梁体表面。注意一方面传感器要与测试表面密切接触，另一方面按压力度要轻而且均匀（按压力度会对传感器体系的自振频率等产生影响）；
- [2] 传感器支座固定：采用特制的传感器支座，使得传感器可以以均匀的力度按压在梁体表面。同时，通过合理的阻尼设计和弹力，还能够提高传感系统的频响特性，建议优先采用。

2.8.5 测试方法最优化

通过对大量检测数据的总结和经验的积累，针对不同的壁厚和工况，我们总结了检测最优组合和次优组合。在实际检测中，首选最优组合，当需要验证或重测时，可考虑选用次优组合。

2.8.6 解析及判定的标准化

通过对大量检测数据的总结和经验的积累，针对不同的壁厚和工况，我们总结了解析及判定方法。在实际分析中，首选标准组合，当有疑问时，应根据标注进行相应调整。

2.9 验证方法及注意事项

2.9.1 灌浆质量缺陷的表象

根据我们对不同类型的上百个孔道的钻孔、切片验证，总结出的孔道灌浆缺陷主要有以下两种大类型：空洞型缺陷；松散型缺陷。

2.9.2 主要验证方法

当采用 IEEV 法定出缺陷位置后，常常在此位置进行钻孔（通常采用 10mm 左右的钻

杆)。不仅可以起到验证的作用,还可作为补浆孔以便处理。一般有:光学方法;阻抗变化;X光透视;机械工具。

2.9.3 验证的局限及注意事项

钻孔验证是最直接的验证方法。但是,钻孔验证也并非一定准确,其错判、漏判的情形也十分常见。而且,在绝大多数情况下,会产生漏判(即将有缺陷判为无缺陷)。造成这样的状况主要有以下原因:钻孔方向的影响;穿丝、挂钩的问题;松散型缺陷。此外,X光透视的方法尽管操作复杂、成本高、需要相应的资质,难以大规模应用。但其具有可视性好的优点,作为冲击回波法的验证手段之一是可取的。

2.9.4 对检测及评价结果出现争议时的处理

当检测方和被检方对测试结果出现争议时,应对测试存在疑问区域进行开孔验证,以确保测试结果的可靠性。但是,考虑到客观性等多方面因素,在钻孔验证时,应该遵循以下原则:

- 1) 应有一定的钻孔数量:考虑到无损检测和钻孔验证各自均有一定的误差,因此每个争议地点的钻孔数量应不少于3个;
- 2) 钻孔口径不宜太小,当钻孔遇到波纹管时应先停下,要避免切断波纹管;
- 3) 钻孔的位置应尽量位于管道的上部;
- 4) 条件允许时,应从上向下钻孔,避免从下向上钻孔;
- 5) 钻孔后宜用内窥镜观察,可辅以挂钩法、穿丝法;
- 6) 对于梁体端部的连续性缺陷,也可利用灌浆孔灌水的方法验证;
- 7) 当钻孔后未发现波纹管时,表明波纹管位置与设计位置偏差过大,应按相关规定处理;
- 8) 当钻孔验证的结果有一半以上与检测结果相符时,应以检测结果为准;
- 9) 当钻孔时未找到波纹管时,一方面说明施工时波纹管定位有误,另一方面也说明混凝土可能存在浇筑缺陷(显示为灌浆缺陷)。此时应该上下改变位置钻孔,继续验证;
- 10) 当钻孔后发现虽无空洞,但灌浆料较为松软时,表明存在疏松型缺陷。

第3章 横(竖)向预应力孔道灌浆密实度检测

3.1 测试的意义

横向及竖向预应力在现浇梁中也有较为普遍的应用。由于种种原因,此类孔道的灌

浆密实度较纵向预应力孔道的更差。根据东南大学对沪宁高速原锡澄运河大桥主桥箱梁的调查结果（2004），横向预应力灌浆密实的孔道只占总数的 24%，而全空的高达 47%。C、D 级缺陷占比则达到了 70%左右，令人怵目惊心。



大桥竖/横向预应力灌浆状况

此类预应力锚索、杆往往只有一端露在外面，因此不能采用第 2 章所述的定性检测方法。在此，我们基于弹性波诱发的自由振动及能量衰减特性，开发了相应的测试方法。

3.2 测试方法和原理

横（竖）向预应力孔道灌浆密实度的检测方法与岩锚杆测试类似。所不同的是，在桥梁中，横向预应力常常采用的是锚索。与锚杆相比，在锚索中传播的弹性波衰减及振动干扰更大，因此不能套用岩土锚杆的检测方法。

3.2.1 测试方法的理论基础

- 1) 基于振动频率的测试方法（振动频率法 VDFM）
- 2) 基于能量衰减的测试方法（局部衰减法 LAEA）
- 3) 基于 IEEV 法的定位检测方法

3.3 试验验证

3.3.1 精轧螺纹钢灌浆现场 IAE/超声阵列对比试验（贵州凯里，2021.08）

应湖南中大邀请，对贵州境内某在役连续刚构桥竖向螺纹钢注浆密实度进行对比检测。大桥腹板均为 2 根并排孔道，孔道直径为 100mm，管道材质为塑料波纹管，孔道埋深约 15cm，腹板总厚度为 0.5~0.7m，螺纹钢直径为 32mm。



图 3-3-7 大桥检测相关照片

测试中，对超声阵列法测出的不同状态（密实、混凝土质量问题、空洞及已知空管）的孔道分别采用冲击回波声频（IAE）、冲击回波等效波速法（IEEV）进行对比测试。超声阵列测试时，X 轴为测试表面垂直测试（即沿管道走向），Y 轴为水平向（顺桥向腹板表面、垂直于管道方向）测试，Z 轴表示腹板深度方向（即腹板深度方向）。检测时，采用面测（矩阵）方式进行。

超声阵列的缺陷孔道的判断总体原则：当孔道位置腹板底部出现绕射且管顶有反射信号时，则为灌浆缺陷。具体步骤为：

- 1) 通过调整测试信号增益，使得腹板底部信号比较清晰；
- 2) 判断腹板底部管道位置反射信号清晰程度，若出现间歇情况，则可确定底部反射信号微弱位置对应孔道位置；
- 3) 在孔道位置判定孔道埋深是否存在反射峰值，若存在反射信号，则基本判断该位置为缺陷孔道。

根据对比测试分析，可以得出：

- 1) 超声阵列法基本能够对注浆质量进行检测，且能准确确定孔道位置，但受信号增益调整及受钢筋影响等存在漏判误判可能较大；
- 2) IAE、IEEV 法能对孔道直径较大的双排临近侧面竖向预应力孔道进行检测；
- 3) 软件及数据处理方面，IAE 及 IEEV 法检测的软件界面可读性高，效率更高，可现场查看分析结果，超声阵列需要导入电脑进行分析，相对繁琐；
- 4) 操作方面，IAE 及 IEEV 检测操作更简便，超声阵列对操作人员体力要求高且不适合现役桥梁箱外操作；

第 4 章 孔道定位

4.1 测试的意义

无论是 IEEV 法检测还是进行处理，对波纹管的位置进行准确定位都是必要的。尽

管在设计时对波纹管的位置有严格的要求，但在实际的工程中，波纹管位置出现较大偏差的现象并不少见。对于波纹管的检测一般采用探地雷达。通常，采用高频电线对探测铁皮波纹管是有很有效的，但对于 PVC 波纹管，则对探地雷达的性能提出了更高的要求。

4.2 孔道定位

4.2.1 模型孔道位置定位验证检测（郑州某环线道路、2018.11）

受北京某研究院邀请，我公司技术人员利用预应力混凝土梁检测仪（SPC-MATS）对郑州某城市快速路箱梁预制块顶板扁锚位置进行验证检测，检测对象为预制模型。

根据提供的信息，该模型外观尺寸为 $1.5 \times 0.6 \times 0.3\text{m}$ ，设计强度为 C60，内部埋设 3 根扁形塑料波纹管，波纹管尺寸为 $4 \times 7\text{cm}$ 。

为了准确测试管道的位置，事先对模型进行波速标定，并利用该波速对孔道位置进行检测。波速标定请参考图 4-2-5。根据波速标定结果，该模型波速为 4.087KM/S 。利用该波速对孔道位置深度进行检测，通过检测验证，该设备能够较为准确的测试孔道的深度。

4.2.2 刚构桥腹板（贵州，2021.08）

受中铁某单位委托，对贵州 HR 高速某刚构桥的缺陷孔道位置进行检测。被测位置为厚度为 50cm 的腹板，混凝土设计强度等级为 C50，采用冲击回波等效波速法（IEEV）及冲击回波声频进行检测。检测时，根据孔道设计位置进行沿孔道走向检测，在发现灌浆缺陷时，再进行竖向测试并确定孔道位置，纵向及竖向测试的测点均相同。



现场检测图

根据检测结果，对缺陷位置的 16 号点进行打孔，验证结果表明：

- (1) 接触式的 IEEV 法对孔道缺陷及位置的判断较好；
- (2) 接触式的 IEEV 法结合纵向及竖向测试，可以有效确定缺陷孔道位置并为后期修补提供有效可靠检测流程；

第 5 章 AI 辅助检测、BQIM 及新一代检测技术

5.1 概述

为了提高分析精度，降低人员负担，我们在积极开发基于 AI（人工智能）的辅助判定系统。同时，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)”。

此外，为了进一步提高灌浆缺陷（特别是厚壁孔道）的定位检测精度，我们在独创技术 IAE（冲击回波声频法，Impact Acoustic Echo）的基础上，正在积极开发新一代检测技术，并取得了良好的效果，将逐步推向市场（STL-IAE）。

5.2 AI 辅助检测

5.2.1 预应力孔道灌浆定位检测 AI 分析模型及数据

- 1) 模型概述

我们采用了贝叶斯网络和人工神经网络建立预测模型，并采用集合学习的方法以进一步提高精度。

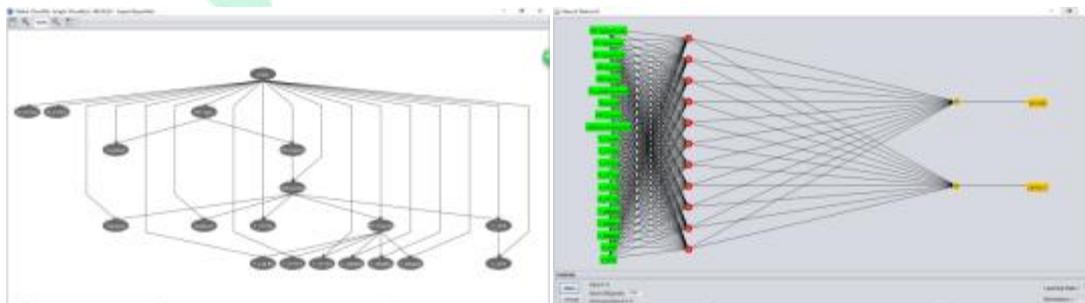


图 5-1-1 AI 检测模型 左：贝叶斯网络模型，右：人工神经网络模型

- 2) 训练数据（截止 2018.06.28）
 - (1) 有效数量：3,050

- (2) 正例 (SOUND) : 1, 396
- (3) 负例 (DEFECT) : 1, 654
- (4) 波纹管类型: 铁皮、塑料
- (5) 管径范围: 0.06~0.08m
- (6) 壁厚范围: 0.18~0.5m
- (7) 测试方向: 水平、竖直
- (8) 传感器: S21C+专用支座

5.1.2 预应力孔道灌浆定位检测 AI 分析精度

对训练数据, 还采用了 10 折交叉验证 (10-fold-Cross-Validation) 的精度有:

- (1) 整体精度在 85~89%, 总体令人满意;
- (2) 由于 DEFECT 的数据较多, 所以 DDR 较高, 但 DMR 误差率还不够十分理想;

5.2.3 AI 预测验证例 (2018.06, 马尔代夫)

1) 概述

应相关单位邀请, 我们对马尔代夫某大桥的桥面的横向预应力束进行了灌浆密实度检测。具体位置为为内海侧及外海侧的翼缘板、以及等厚段的顶板:

2) 检测结果

以 1457 个测点作为评判依据, 比较了 AI、人工判断的准确性。

- (1) AI 判断的准确性达到了 92.7%, 大幅超过了人工的精度;
- (2) AI 和人工的缺陷检出率 (DDR) 相差不大, 均在 75%左右;
- (3) AI 的误检率 (DMR) 则远小于人工;

5.3 新一代无损检测技术 IAE

5.3.1 IAE 概述

IAE 是我们开发的新一代冲击回波无损检测技术, 其最大的特点是传感器与被测体不接触, 通过声耦合的方式拾取信号, 进而大大提高了信号的真实性和检测的精度、重复性等有了飞跃性的提高。

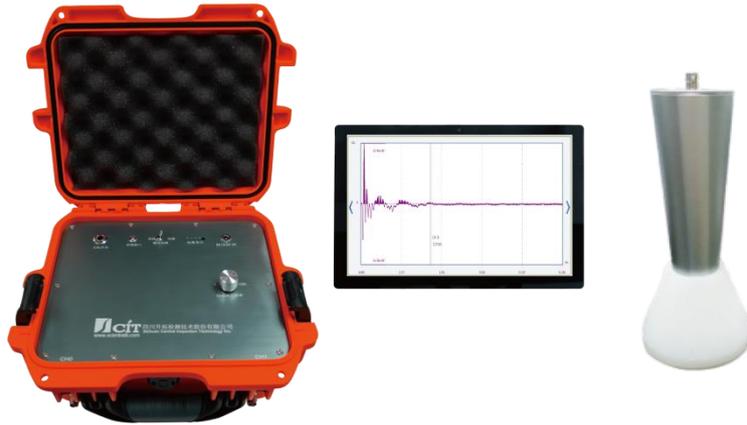
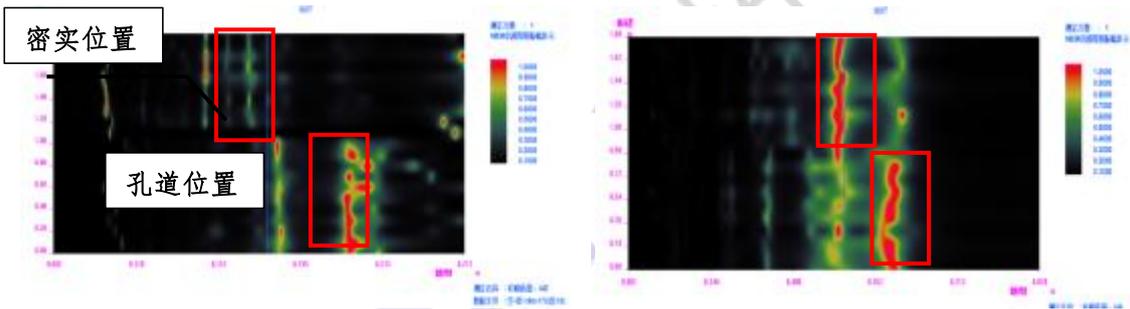


图 5-3-1 冲击回波声频检测仪 (STL-IAES-B)

5.3.2 密实与孔道区别及纵向孔道定位测试 (云南、2019.07)

1) 一般厚度 (0.18m-0.5m) 结构可行性试验

首先对不同结构厚度 (0.18m、0.5m 厚结构, 设计强度 C50) 的孔道及密实区域进行测试对比, 分析波速 4.35km/s, 对比结果如下:



0.18m 左、0.5m 右 腹板孔道-密实位置定点 (17C) 对比结果

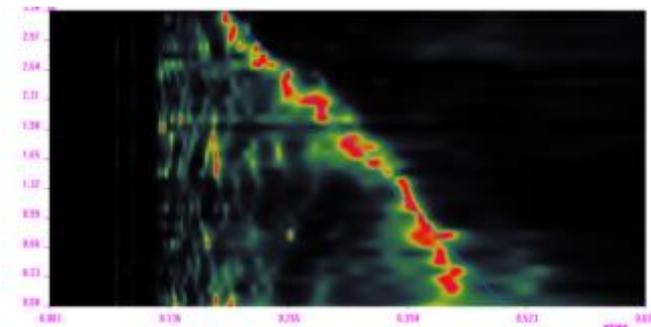
2) 小结

- (1) 针对 0.18m-0.5m 厚度结构, 采用声频检测设备测试灌浆情况应该还是可行的, 可以较明显区分出孔道与混凝土密实区域;
- (2) 针对 0.7m 及以上厚度结构, 其对纵向孔道进行定位效果较差, 分析其原因为:
 - ①可能为 d/h 过小 (孔道/壁厚= $0.06/0.7=0.085$);
 - ②对孔道定位时, 由于敲击点距离最近其他孔道距离可能较腹板厚度更小, 可能受临近孔道影响;
- (3) 实际测试过程中, 除正常底部反射信号外, 频谱中容易出现双频谱情况;

5.3.3 现场孔道灌浆密实度检测（云南、2019.07）

1) 一般厚度（0.2m-0.5m）结构实体灌浆密实度检测

现场我们利用建（个）元高速 TJ1 标项目梁场的某梁体（0.2m-0.5m 渐变）实体结构进行了孔道灌浆密实度检测，检测结果如下：



0.5m-0.2m 厚度混凝土标定图

可见：

- (1) 一般厚度（0.2m-0.5m）结构实体孔道（空）与密实采用声频检测有明显延迟，且采用 17C 与 30C 测试结果对比，信号基本稳定一致；
- (2) 与标定信号对比分析，可以认定存在缺陷。

5.3.4 IAE 测灌浆密实度现场验证（贵州都匀、2020.05）

因某工程出现孔道注浆方面严重质量问题，我公司受邀进行技术支持，并用 IAE 对孔道灌浆质量进行测试及验证。具体包括管道位置检测、灌浆密实度检测及验证。

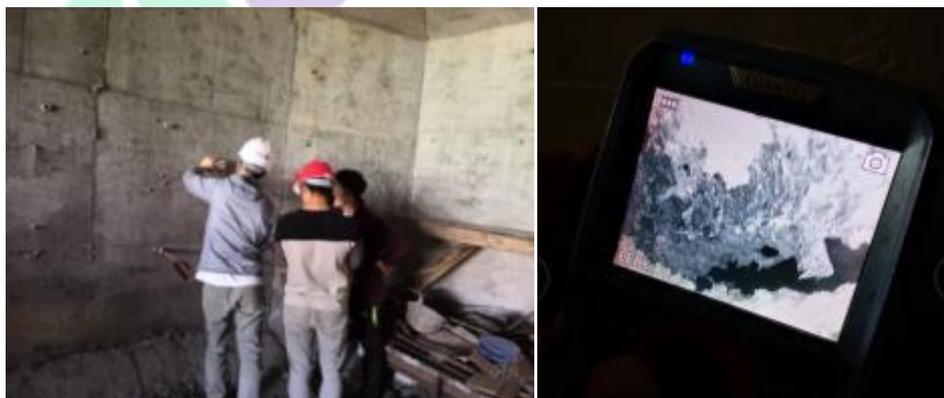


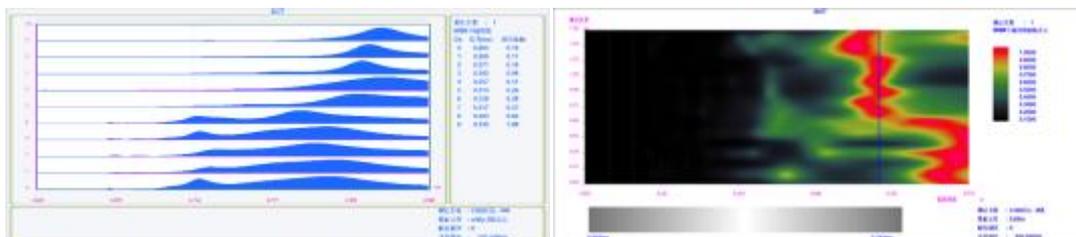
图 5-3-16 测试及内窥镜验证情景

1) 确定管道位置

采用垂直于波纹管方向的测试，逐点测试，可检测波纹管（特别是 PVC 管）的位置。

2) 灌浆缺陷检测及验证

用 IAE 采用 IEEV 法对灌浆密实度进行了检测验证，在明确了波纹管位置的地方，检测结果与钻孔验证结果一致。



底部反射时间在灌浆缺陷处明显滞后（右为 75cm 厚的顶板）

3) 小结

- (1) 在预应力孔道灌浆的检测精度方面，IAE 法优于接触式的 IEEV 法；
- (2) 对 PVC 波纹管并在一定条件下，IAE 可对孔道位置进行检测；

结语与致谢

我们潜心多年研制的相关设备可以对预应力梁中的孔道灌浆密实度，包括纵向、横向和竖向进行综合无损检测。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。

在该设备中，包含了大量的独创性技术，如孔道灌浆密实度检测中的全长衰减法（FLEA）、传递函数法（PFTF）、冲击回波等效波速法（IEEV）等。这些方法使得我们的测试技术得到了国内外广泛的认可，均已申请了国家发明专利并取得多项授权。

2011 年，相关技术获中国公路学会科技进步三等奖；

2012 年，相关技术获中国市政学会科技进步二等奖；

2014 年，预应力混凝土梁多功能检测仪（SPC-MATS）获“2014 年度国家重点新产品计划（科技部）”立项。

在此，我们衷心期望这些技术、方法和设备能够为我国的桥梁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、6861-1527
 - ✘ MAIL: Support@scentralit.com
 - ✘ HTTP: www.scentralit.com
- ✓ 有关本资料的最新更新，可在本公司网站的下载中心下载：

http://www.scentralit.com/download_201003181343459218.html

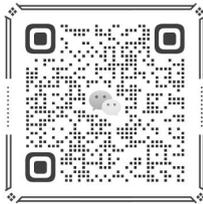
升拓相关官网与平台：

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