# CRTSⅢ型板式无砟轨道伤损检测技术

## （V1.25）

2013-11-08 初稿

2019-09-06 第 20 次修订
2020-02-23 第 21 次修订
2021-02-23 第 22 次修订

四川升拓检测技术股份有限公司

www.scentralit.com

# 本报告对应设备

1、 无砟轨道板多功能无损检测仪 SSB-MATS（S）

2、 无砟轨道板脱空检测仪 SSB-SVT（PA）

# 对应规程

1、 《冲击回波法检测混凝土缺陷技术规程》(JGJ/T411-2017)，中华人民共和国住房和城乡建设部，2017.6.6 颁布，2017.11.1 实施。

# 参考资料

1、 《土木工程检测与测试》，高等教育出版社，2015 年 2 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（公司技术资料）

4、 SCIT-1-TEC-02-混凝土材料及结构综合检测技术体系（公司技术资料）

5、 SCIT-1-TEC-02A-结构脱空检测技术体系（公司技术资料）

6、 SCIT-1-TEC-02B-CRTSⅡ型轨道板伤损检测技术体系（公司技术资料）

# 目　录

简略语.....1
术语.....1
符号说明.....1
第 1 章　概述.....2
第 2 章　Ⅲ型轨道板脱空检测.....3
2.1　技术基础.....3
2.1.1　检测对象.....3
2.1.2　检测方法概述.....5
2.1.3　激振频率的选取.....6
2.1.4　其他影响因素.....8
2.1.5　Ⅲ型板激振锤选取及脱空判定阈值的设定.....8
2.1.6　脱空判定及评价.....8
2.1.7　检测精度和稳定性的提高.....8
2.2　轨道板修补效果检测.....10
2.2.1　修补材料脱空的模型.....10
2.2.2　修补材料脱空的判定阈值.....11
2.3　基于板振动理论的离缝深度检测.....12
第 3 章　模型试验及现场验证.....13
3.1　模型试验.....13
3.1.1　室内轨道板模型（中国铁道科学研究院，2014.03）.....13
3.1.2　Ⅲ型轨道板施工检测（郑徐客专，2014 年 7 月）.....16
3.1.3　Ⅲ型轨道板施工检测（京沈客专，2016 年 5 月）.....17
3.1.4　Ⅲ型轨道板施工检测（济青客专，2016 年 11 月）.....19
3.1.5　Ⅲ型轨道板首件检测（成贵客专，2017 年 02 月）.....23
3.1.6　Ⅲ型轨道板检测（商合杭客专，2018 年 07 月）.....25
3.1.7　Ⅲ型轨道板模型验证（山西太原，2019.09）.....26
3.2　现场轨道板验证和应用.....28
3.2.1　现场验证及应用（京沪高铁，第一阶段，2016.03～）.....28
3.2.2　重复性验证（ZF 高铁，2019.06）.....29
3.2.3　Ⅲ型轨道板检测（ZF 客专，2019 年 03～06 月）.....30
3.2.4　道岔板脱空整体特征分析.....32
3.3　修补效果确认检测.....33
3.3.1　现场应用（京沪高铁，2015.10）.....33
3.3.2　现场应用（ZF 客专，2019.03-05）.....35
3.3.3　现场应用（ZF 客专，2019.06）.....36
3.3.4　道岔板脱空修补效果检测（上海铁路局，2020.10-12）.....37
第 4 章　展望.....39
结语与致谢.....40
参考文献.....41
版本修订说明.....42

技术支持.....43

CIT 升拓检测®

# 简略语

FFT：Fast Fourier Transform，快速傅里叶变换

IE：Impact Echo method，冲击回波法

MEM： Maximum Entropy Method，最大熵法

P 波： Primary wave，疏密波、纵波；

S 波： Secondary wave，剪切波、横波；

R 波： Raleigh Wave，瑞利波；

# 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；

超声波：原定义是“在空气中传播的，频率超过 20KHz 的人耳不能听见的声波”，通常由压电材料产生，在空气中为疏密波，即 P 波。由于波长短、指向性较好，被广泛用于各个领域；

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

$f$ = 频率，单位 Hz；

$E_d$ = 动弹性模量，单位 GPa；

$E_c$ = 混凝土弹性模量，单位 GPa；

$z$ = 材料的机械阻抗；

$\alpha$ = 分位点，取 0.01 和 0.05；

$I_{Pk}$ = 轨道板的整体脱空指数；

$H_i$ = 轨道板健康指数；

# 第 1 章 概述

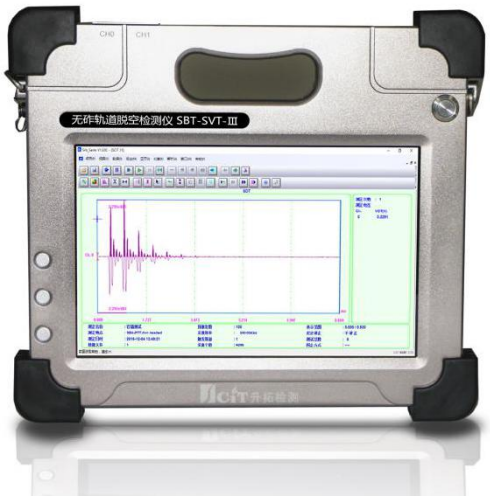
2008 年我国开通了首条高速铁道京津城际，此后我国高速铁路建设得到了迅猛发展。其中，无砟轨道成为了主流。我国无砟轨道线路中轨道结构分为预制板式和现浇混凝土式两大类，共 6 种结构形式：CRTS Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ型板式，双块式、岔区轨枕埋入式和板式无砟轨道。其中，CRTSⅢ型轨道板是我国具有自主知识产权的板式无砟轨道成套技术，正成为我国高铁轨道技术的主流。

CRTSⅢ型板式无砟轨道总体结构方案为带挡肩的新型单元板式无砟轨道结构，主要由钢轨、扣件、预制轨道板、配筋的自密实混凝土（自流平混凝土调整层）、限位挡台、中间隔离层（土工布）和钢筋混凝土底座等部分组成。

轨道结构采用单元分块式结构，在路基、桥梁和隧道地段轨道板间均采用不连接的分块式单元结构。底座板在每块轨道板范围内设置两个限位挡台（凹槽结构），底座板与自流平混凝土层间设置中间隔离层。

CRTSⅢ型板在施工中的主要控制指标之一为轨道板与调整层间的结合程度。但在施工过程中，自密实混凝土与上面的轨道板之间容易出现大气泡、疏松等问题。而在运营过程中，由于温度应力、施工不良等原因，自密实混凝土与轨道板之间则容易产生脱空等问题，从而为行车安全带来隐患。

为此，我们在拥有的混凝土检测技术和设备的基础上，与相关单位一道，研究开发了相应的专用检测设备。根据大量的模型和现场验证，该技术和设备能够有效地检测轨道板的脱空的有无和位置，不仅适用于Ⅱ型板、也适用于Ⅲ型板，并达到了实用化水平。




**照片 1-1 检测设备原型**

相关内容可参见 SCIT-1-TEC-02B-CRTSⅡ型轨道板伤损检测技术体系（公司技术资料）。

# Ⅲ型轨道板脱空检测

我们以冲击弹性波及冲击回波法（IE 法）基础，通过对算法、设备的改进，开发了轨道板脱空的检测方法和设备。

## 2.1 技术基础

### 2.1.1 检测对象

检测对象为Ⅲ型轨道板以及道岔板。

**表 2-1-1 检测对象及主要参数**

| 构件 | 参数 | Ⅲ型 | 道岔 |
|---|---|---|---|
| 预制轨道板 | 材料 | 钢筋混凝土 | 钢筋混凝土 |
| | 高度（mm） | 200 | 240 |
| | 混凝土强度 | C60 | C60 |
| | 弹性模量（GPa） | 36 | 36 |
| | IE 波速(km/s) | 4.1～4.3 | 4.1～4.3 |
| Ⅲ型轨道板：调整层<br>道岔：底座板 | 材料 | C40 自密实混凝土 | C40 自密实混凝土 |
| | 高度（mm） | 90～100 | 180 |
| | 弹性模量（GPa） | 25～30 | 25～30 |
| | IE 波速(km/s) | 3.4～3.8 | 3.4～3.8 |
| Ⅲ型轨道板：支撑层<br>道岔： 垫层/找平层 | 材料 | 钢筋混凝土 | 钢筋混凝土 |
| | 高度（mm） | 200～300 | 130 |
| | 弹性模量（GPa） | 34 | 28 |

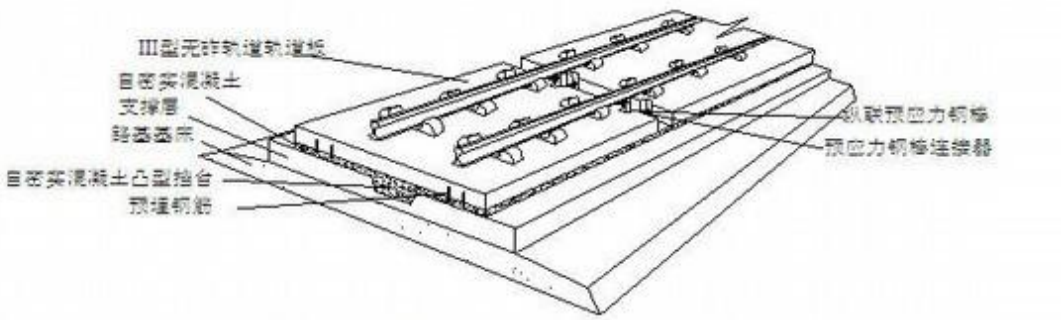



图 5.5.7 路基上 Ⅲ型板式无砟轨道结构图

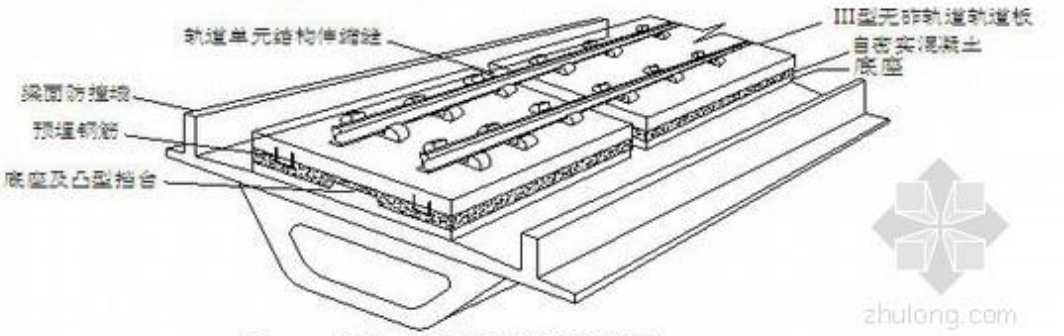



图 5.5.7 桥上 Ⅲ型板式无砟轨道结构图

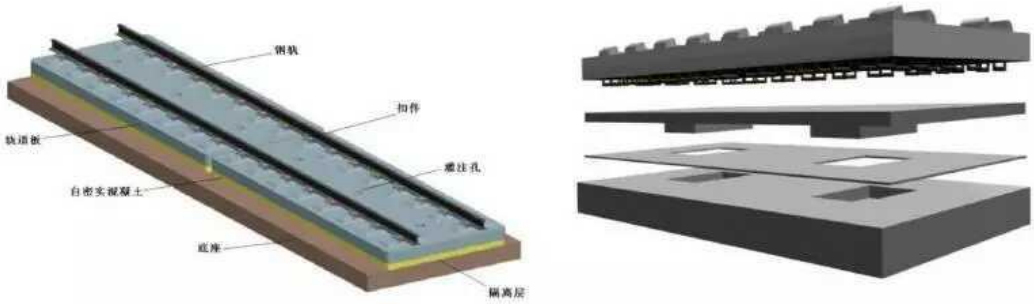



图 2-1-1 Ⅲ型轨道板结构示意图

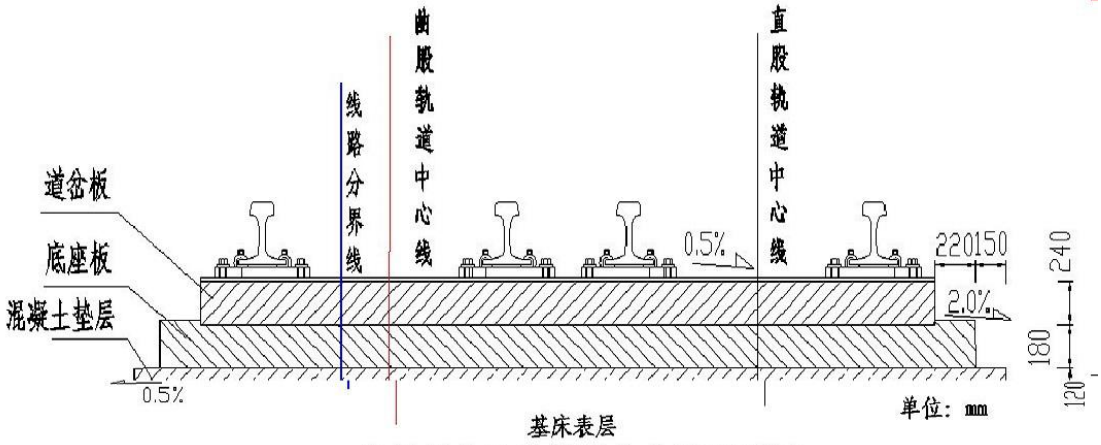



图 2-1-2 道岔无砟轨道板结构示意图（路基地段）

检测脱空对象为：

1）Ⅲ型轨道板：轨道板与调整层间脱空、调整层与底座板（支撑层）间脱空；

2）道岔板：道岔轨道板与底座板间脱空；

**照片 2-1-1　道岔板脱空状况**

### 2.1.2　检测方法概述

轨道板脱空检测采用冲击回波法（IE 法），其概念如下图所示：

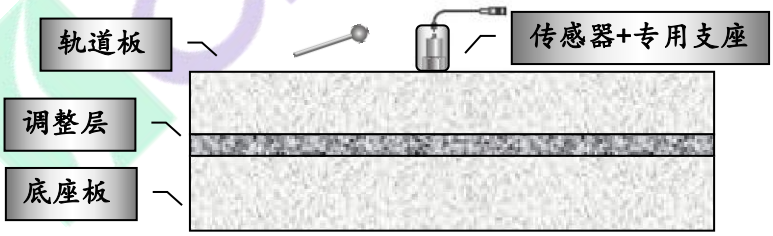



**图 2-1-3　轨道板脱空检测示意图**

基本原理等与 CRTSⅡ型板的检测相同，相关资料参见：

1）SCIT-1-TEC-00-冲击弹性波检测技术基本原理（公司技术资料）

2）SCIT-1-TEC-02-混凝土材料及结构综合检测技术体系（公司技术资料）

3）SCIT-1-TEC-02A-结构脱空检测技术体系（公司技术资料）

4）SCIT-1-TEC-02B-CRTSⅡ型轨道板伤损检测技术体系（公司技术资料）

其中，Ⅲ型板与Ⅱ型板最大的差异在于调整层材料以及厚度的差异（如下表）：

**表 2-1-2　调整层材料的差异**

| 构件 | 参数 | Ⅱ型 | Ⅲ型 |
|---|---|---|---|
| 调整层 | 材料 | CA 乳化沥青水泥砂浆 | C40 自密实混凝土 |
| | 高度 | 30mm | 90～100mm |
| | 弹性模量 | 7～10GPa | 25～30GPa |
| | IE 弹性波波速 | 1.9～2.3 km/s | 3.4～3.8 km/s |

由于上述差异，使得在测试和分析时，会有一定的不同。

### 2.1.3　激振频率的选取

无论是Ⅲ型板还是Ⅱ型板，选取合适的信号频率对轨道板脱空检测具有决定性的意义，其核心在于尽可能分离从填充料反射的信号和从缺陷处反射的信号。因此，对轨道板脱空检测来说，如何提高缺陷处的信号反射率，降低填充料的信号反射率就成为了关键所在。

对于脱空处的反射，Ⅲ型板与Ⅱ型板完全相同。

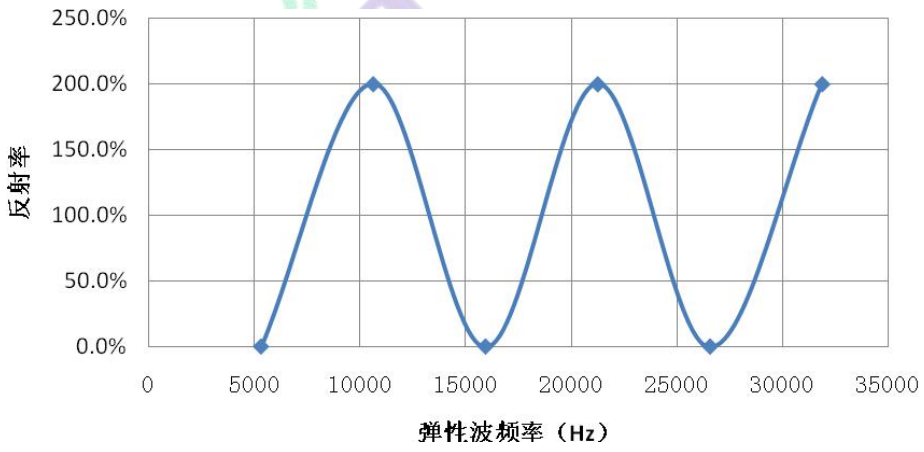



**图 2-1-4　脱空处的频率反射特性**

另一方面，对于调整层的反射信号，由于夹层的存在，使得入射信号会发生连续反射，使得其反射信号的相位并非单一，而是多个相位信号的叠加。

分析方法与Ⅱ型板相同，可以得到不同入射频率 $f_s$ 与反射率 $R$ 的关系。

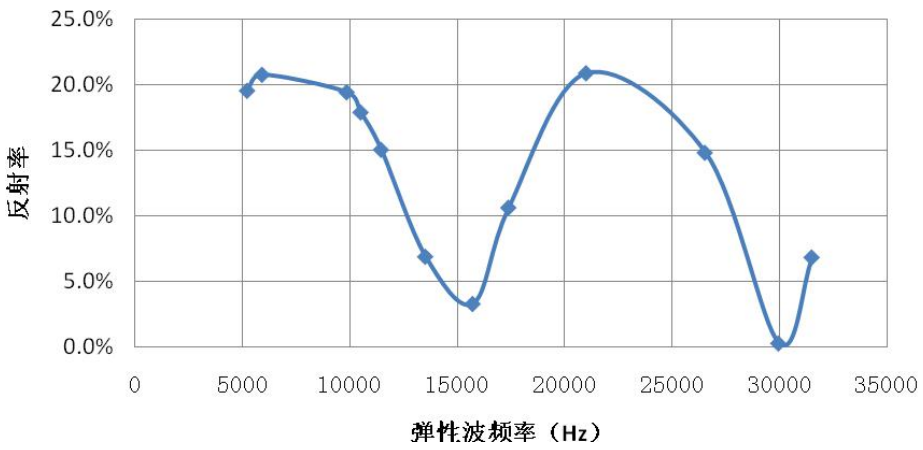



**图 2-1-5　Ⅲ型板调整层的频率反射特性**

可以看出，在 D10～D50 锤的范围内，对于Ⅲ型板，随着锤 50→10 质量的降低，反射率整体呈下降趋势，但在 D22 的锤会出现一个相对低谷。

根据不同激振锤诱发的弹性波的频率，以及计算得到的反射率比值如下表和图。

**表 2-1-3　不同激振锤的反射率比值**

| 激振锤 | 激振频率（Hz） | Ⅱ型 | Ⅲ型 |
|---|---|---|---|
| D50 | 5910 | 2.933 | 4.808 |
| D30 | 9850 | 2.655 | 5.138 |
| D26 | 11450 | 1.898 | 6.633 |
| D22 | 13510 | 1.839 | 14.44 |
| D17 | 17380 | 1.770 | 9.381 |
| D10 | 29950 | 1.672 | 325.5 |

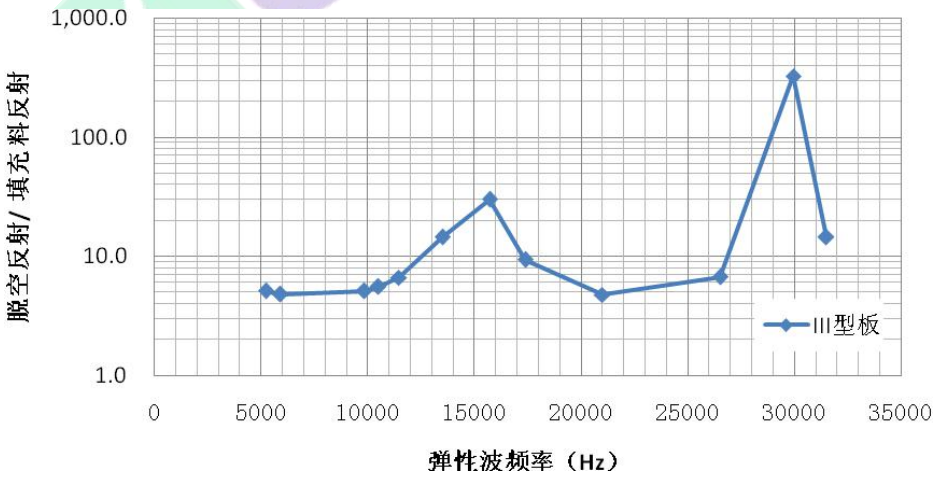



**图 2-1-6　Ⅲ型板调整层的脱空反射/健全部位反射比率**

### 2.1.4 其他影响因素

在轨道板脱空检测中，除了激振频率（激振锤）的影响以外，还有激振力度、激振离散性以及轨道板边、角测试时板波的诱发等因素需要考虑。

激振力度对测试结果的影响主要有两部分：

1）激振频率发生变化：一般而言，激振力度越大，诱发的弹性波的频率越高。在一般检测人员的作业中，人工激振引起的激振频率的变化不超过±10%。对于 D26 以上的激振锤，由于诱发的频率较低，频率变化值相对较小，而对于 D10 等小直径激振锤，频率变化值则相对较大；

2）板波的诱发：当脱空面积较大，且无铁轨约束时（如边、角），轨道板在较大力度激振条件下有可能诱发板波，从而严重影响检测的精度。此外，大的激振锤比小的激振锤更容易诱发板波；

3）边界条件的影响：对于轨道板的 IE 反射，在板的中间部位与边缘部位的反射是有所不同的。

因此，我们在测试及分析中，采用了如下的方法：

1）对边缘部分，采用后述的基于 1 阶频率的方法推算离缝深度并以此作为脱空检测的重要补充；

2）对于 IE 法，在保证信噪比的条件下，尽可能采用小力度激振是有益的。

### 2.1.5 Ⅲ型板激振锤选取及脱空判定阈值的设定

综上所述，我们对Ⅲ型板可采用 D22 或 D17 锤进行激振，其原因在于：

1）不容易诱发板波；

2）由于脱空与健全部位的区别较大，因此脱空判定阈值可选取 3～5 倍基准值。

### 2.1.6 脱空判定及评价

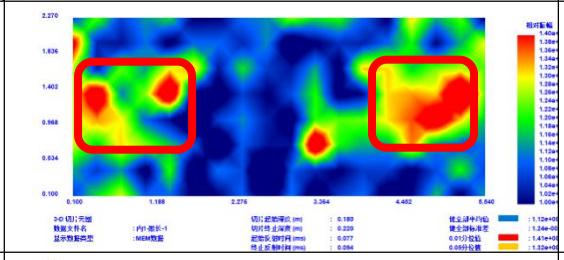
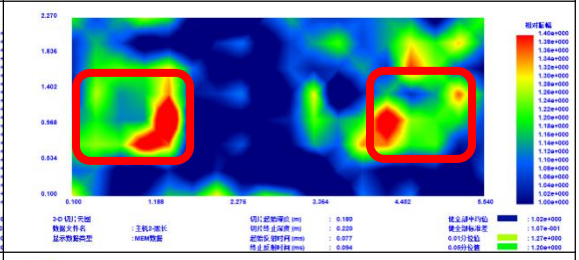
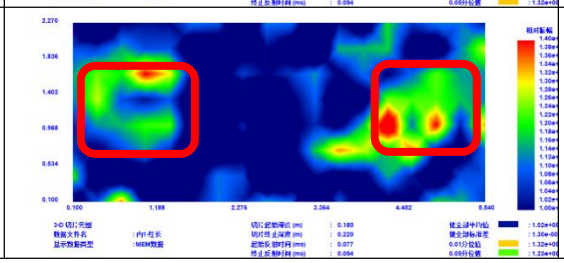
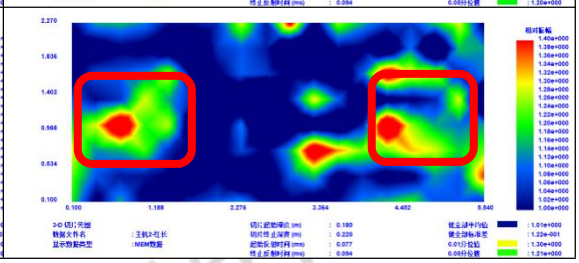
脱空判定的方法与Ⅱ型板相同，所不同的是其脱空阈值可适度上调。

### 2.1.7 检测精度和稳定性的提高

由于采用绝对幅值反射率的方法，对传感器的固定方式有较高的要求。而且，当脱空面在板的边缘，且面积较大时，由于会形成板波，反而会减少反射幅值。为此，我们开发了比值法。

1）重复性分析

**表 2-1-4　比值分析重复性对比**

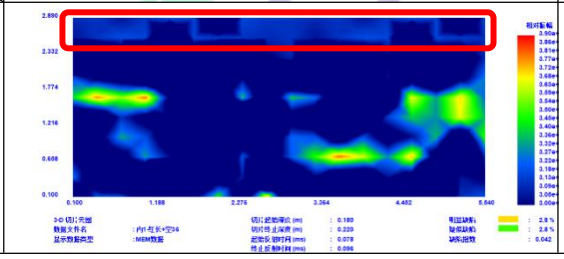
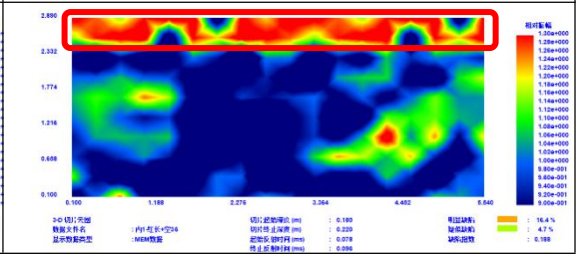
| 主机<br>传感器 | 01 主机 | 02 主机 |
|---|---|---|
| 01# |  |  |
| 02# |  |  |

可以看出，无论是缺陷位置（均在图中间左右两侧红框位置），还是脱空程度，比值法的重复性都较好。

2）边缘脱空影响

对边缘脱空，幅值分析与比值分析的结果如下。等值线云图最上面两条测线为完全脱空（红框位置），分析结果相应位置应为红色。

**表 2-1-5　边缘脱空数据对比分析**

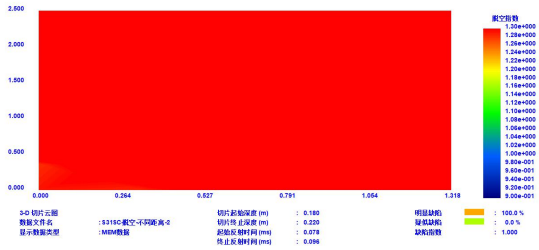
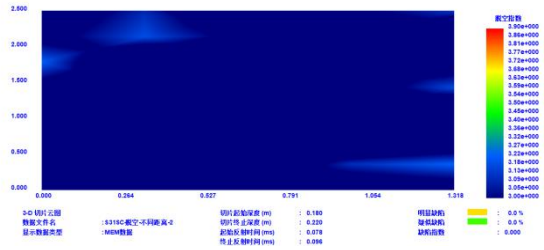
| 分　析<br>方法数据 | 幅值分析 | 比值分析 |
|---|---|---|
| 同一数据 |  |  |

测试结果显示，比值法能较好的分析出边缘脱空的位置，而幅值法则不能。

3）完全脱空影响

对完全脱空，可以看出，比值分析比幅值分析的可靠性有了大幅度的提高。

**表 2-1-6 完全脱空轨道板数据对比**

| 描画<br>脱空 | 比值 | 幅值 |
|---|---|---|
| 完全脱空 |  |  |

## 2.2 轨道板修补效果检测

对于脱空的轨道板，采用聚氨酯类材料修补是一般的处理方法。然而，出于种种原因，修补工作存在如下问题：

（1） 修补材料充填不足：由于脱空面积并非连通，经常存在未能充填的部位；

（2） 修补工艺问题：如施工时注胶压力过大时，有可能造成脱空层中的残留水分被挤压，进而对原健全部位的水力劈裂，对轨道板造成新的损伤；

（3） 本身与轨道板之间发生脱离：在修补后的运营过程中，由于温度、外力等原因，修补材料本身会与轨道板产生脱空。

因此，对于修补效果的检测也是非常必要的。

### 2.2.1 修补材料脱空的模型

修补材料的种类很多，大致可分为树脂型和树脂砂浆型，其特性如下：

（1） 树脂型：弹性模量大致在 0.2～0.4GPa，温度高时模量低，密度在 35～40kg/m$^3$，成分主要为聚氨酯、环氧树脂等高分子材料；

（2） 树脂砂浆型：弹性模量大致在 17～18GPa，密度在 1700～2300kg/m3，成分主要是环氧树脂和石英砂等混合材料；

修补层的厚度大致在 1～5mm 左右，与轨道板的翘曲模式、注胶压力等有关。

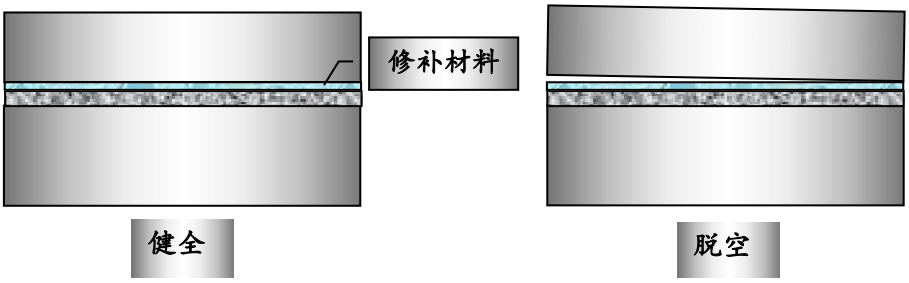



图 2- 2-1 修补概念

对于修补后的轨道板，在已脱空的区域，激振的弹性波的反射参数与未修补的轨道板相同。而在未脱空的部分，不同的修补材料则有很大的不同。对于树脂砂浆型的修补材料，由于其模量与混凝土接近，因此可看作是混凝土层而不作特别处理。

对于树脂系（如聚氨酯系）修补材料，其弹性模量很低（一般在夏季的 0.2GPa 到冬季的 0.4GPa），因此与相邻的 CA 砂浆层一起形成了双层夹层。由于双层夹层的理论分析较为困难，所以采用等效模量的方法，即修补层+CA 砂浆层的模量 $E_{RCA}$ 计算。

因此，对于Ⅲ型板（自密实混凝土层厚 10cm），不同季节的复合夹层的弹性模量 $E_{RCA}$ 如下。

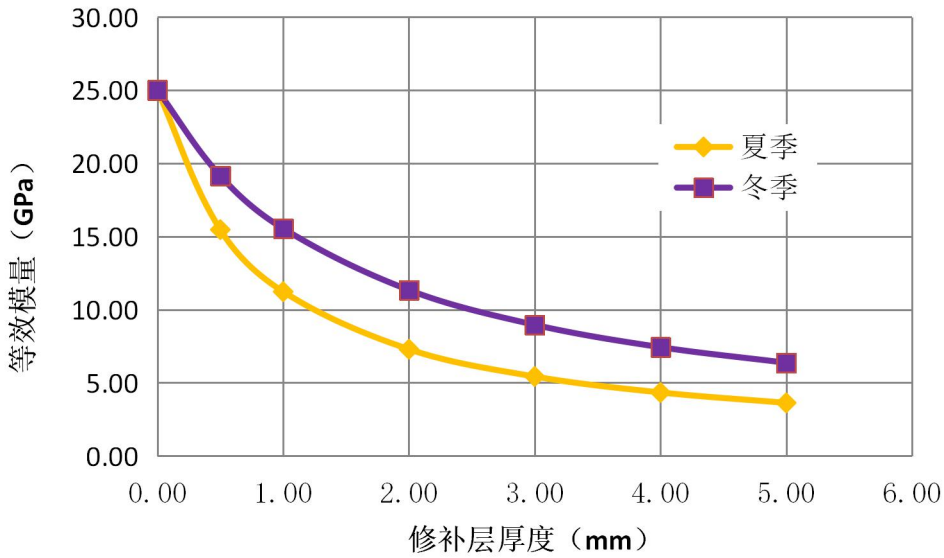



图 2-4-1 夹层的弹性模量

可以看出，随着修补层厚度的增加，夹层的等效模量急剧降低。

### 2.2.2 修补材料脱空的判定阈值

对于树脂砂浆，其脱空与否的判断阈值与无修补的情形相同。而树脂（如聚氨酯）修补材料的模量很低，因此其脱空判断阈值将有所变化。根据前节中计算得到的等效模量，以目前最常用的 D17 锤为例，可以计算得到反射率比值。

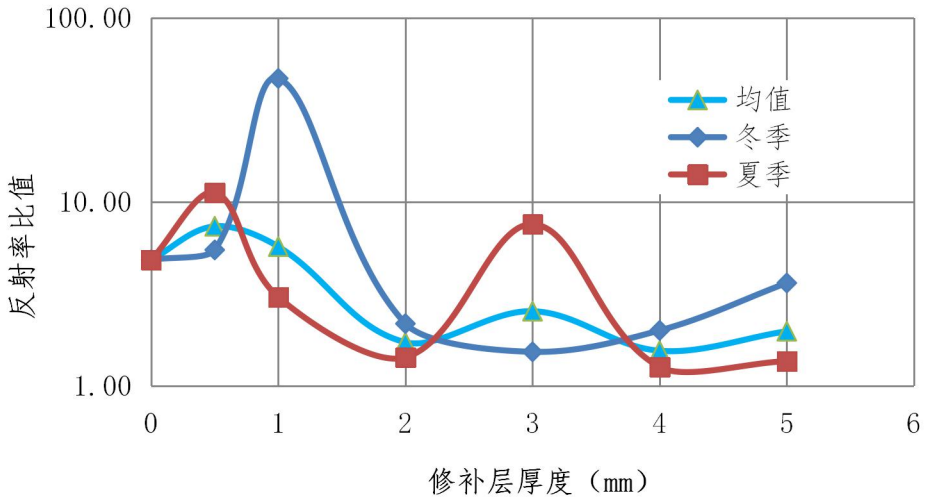



图 2-4-2　Ⅲ型板调整层的脱空反射/树脂材料修补后反射比率

表 2-4-1　不同条件下的反射率比值

| 修补厚度 | 均值 R | 反射率比均值 | 夏季 | 冬季 |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 0.21 | 4.84 | 4.84 | 4.84 |
| 0.5 | 0.14 | 7.36 | 11.23 | 5.48 |
| 1 | 0.18 | 5.71 | 3.04 | 46.87 |
| 2 | 0.58 | 1.72 | 1.43 | 2.18 |
| 3 | 0.39 | 2.55 | 7.55 | 1.53 |
| 4 | 0.64 | 1.55 | 1.27 | 2.00 |
| 5 | 0.50 | 1.98 | 1.36 | 3.62 |

由此可见，对于树脂修补材料，不同时期、不同修补厚度的反射率比值差异很大。因此，脱空的阈值根据试验结果，参考上表进行取值。这一点与Ⅱ型板有很大不同。

## 2.3　基于板振动理论的离缝深度检测

与Ⅱ型板相同。

# 第 2 章　模型试验及现场验证

为了验证技术和设备的检测精度，我们分别进行了模型试验和现场验证。

## 3.1 模型试验

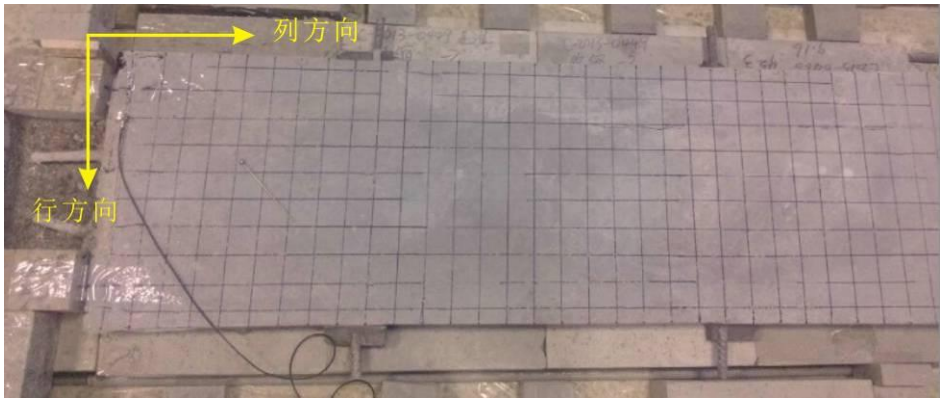
### 3.1.1 室内轨道板模型（中国铁道科学研究院，2014.03）

1）概述

测试对象为 1.5m*0.5m*0.07m 的混凝土实验板，共两块：1 号实验板设置了缺陷（缺陷包括塑料薄膜袋、瓶盖等），2 号实验板未设置缺陷。

测试时根据预设缺陷尺寸大小对测点进行布置，行方向每点间隔为 0.05m，每行之间(列方向)的间隔也为 0.05m。测试对象如下图所示：

照片 3-1-2　1#板预设缺陷




**照片 3-1-3　实验板及测试布点**

2）1#板测试结果

**表 3-1-1　1#板测试结果与预设结果对比**

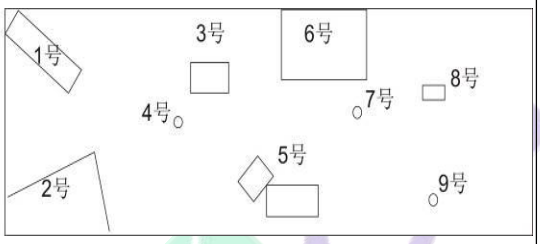
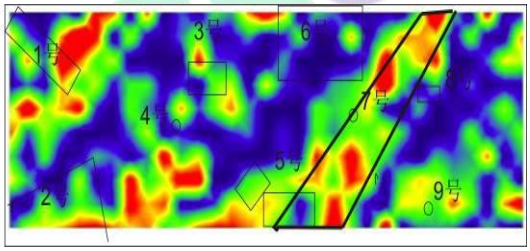
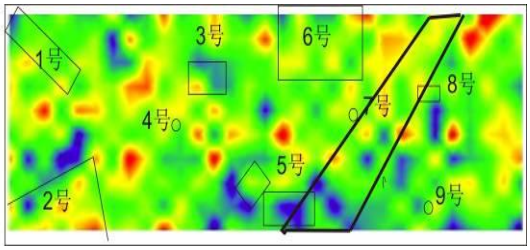
| | |
|---|---|
| | 揭板后照片（黑色框内灌浆材料有凹下痕迹，疑似存在缺陷带） |
|  | 1 号板缺陷设置示意图及缺陷自编号 |
|  | 该图为 IE（冲击回波法）分析结果。<br>该图为顶板与灌浆体交界面聚焦扫面图。图中红色和黄色表明该处存在脱空，红色脱空可能性更大； |
|  | 该图为 IEEV（等效波速法）分析结果。<br>该图为底板界面聚焦扫面图。图中，蓝色区域表明弹性波反射信号迟延，表明该处存在脱空可能性。 |

**表 3-1-2　1 号实验板缺陷检测情况表**

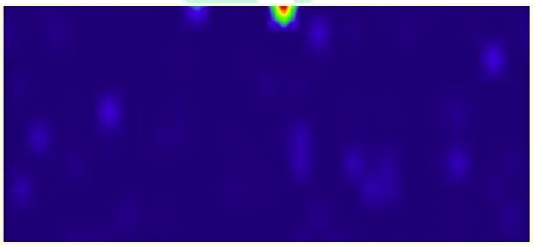
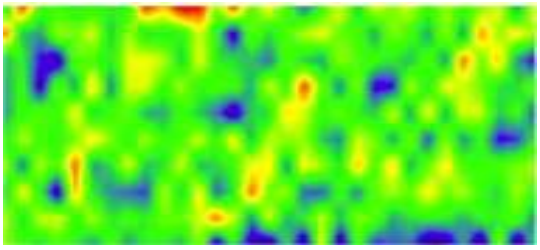
| 缺陷编号 | 对应 | IE | IEEV | 说明 |
|---|---|---|---|---|
| 1 号缺陷 | ○ | √ | | 缺陷尺寸和形态有所差异，检测结果尺寸偏大 |
| 2 号缺陷 | ○ | √ | | 缺陷形态基本一致，检测结果尺寸偏大 |
| 3 号缺陷 | ◎ | √ | √ | 形态大小基本和设计一致 |
| 4 号缺陷 | ◎ | √ | | 形态尺寸和设计基本一致 |
| 5 号缺陷 | ○ | √ | √ | 检测结果形态和实际有差异，检测区域尺寸偏大 |
| 6 号缺陷 | △ | √ | √ | 基本测出，但大小与设计相差较大 |
| 7 号缺陷 | △ | √ | | 形态不明（被其他区域覆盖） |
| 8 号缺陷 | ◎ | √ | | 形态尺寸基本和设计一致 |
| 9 号缺陷 | ○ | √ | √ | IE 形态和尺寸偏大，等效波速法和实际基本一致。 |
| 黑色框内 | ◎ | √ | √ | 明确地反映了自密实混凝土缺陷的情况 |

◎：位置、大小均对应；○：位置、大小基本对应；△：位置、大小部分对应；

综上所述，除 6 号缺陷以外，其他缺陷均能通过冲击回波或者等效波速法检测出。6 号缺陷测出的缺陷面积较小，与设计相差较大。原因可能在于填充（塑料薄膜+1 张纸）较薄，由于灌浆材料的膨胀作用使得接触面上存在压应力，导致该处缺陷反映不明显。

3）2#板测试结果

**表 3-1-3　2#板测试结果与预设结果对比**

| | |
|---|---|
| | 无预设缺陷<br>揭板后照片（灌浆料土存在诸多气泡） |
|  | 该图为 IE（冲击回波法）分析结果。<br>该图为顶板与灌浆体交界面聚焦扫面图。图中红色和黄色表明该处存在脱空，红色脱空可能性更大； |
|  | 该图为 IEEV（等效波速法）分析结果。<br>该图为底板界面聚焦扫面图。图中，蓝色区域表明弹性波反射信号迟延，表明该处存在脱空可能性。 |

从 2#板测试结果来看， 除局部外砂浆与顶板的结合性能较好。但 IEEV 法表明仍存在一定的低速区，说明砂浆层的力学性质存在一定的离散性。从揭板情况来看，灌浆材料自身存在诸多气泡。

### 3.1.2 Ⅲ型轨道板施工检测（郑徐客专，2014 年 7 月）

1）概述

检测对象为郑徐线某梁场的Ⅲ型试验板，对象尺寸为 6.0m*2.5m*0.2m（长*宽*高），主要针对自密实混凝土灌注效果进行检测。

**照片 3-1-6　测试对象及揭板照片**

2）平面成像结果及对比

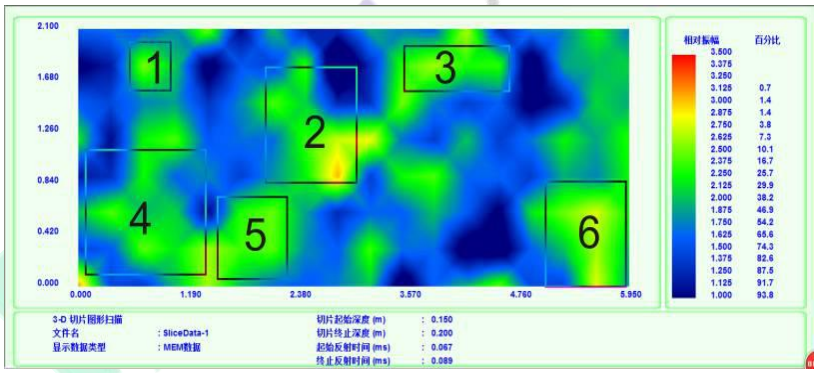


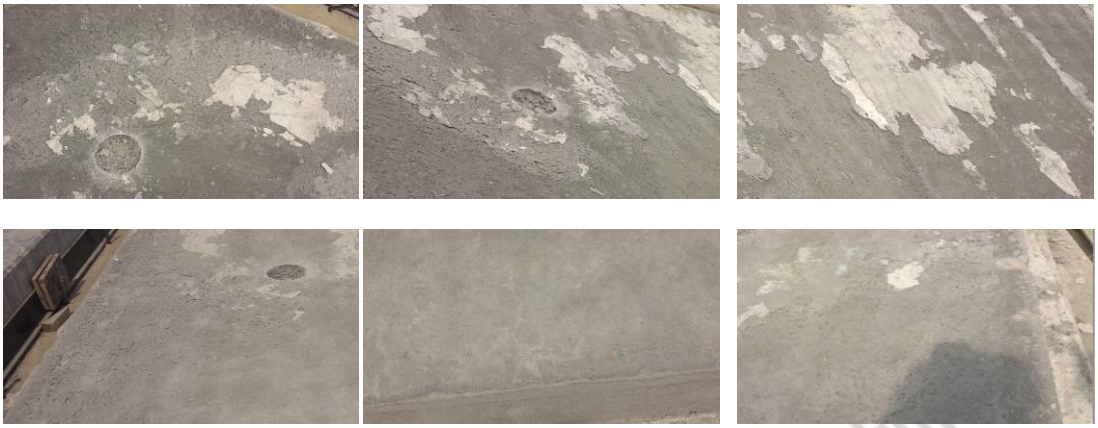

**图 3-1-6 检测结果（图中数字为缺陷区域）**

与揭板后的结果对应如下表所示。除 5#区域以外，其它各区域对应均较好。

**表 3-1-5　实验板缺陷对比表**

| 区域 | 揭板情况 | 对应 |
|---|---|---|
| 1# | 存在较为明显发泡层，且轨道板底部覆盖砂浆与轨道板接触较差 | ○ |
| 2# | 存在较为明显发泡层，自密实混凝土材料也较为疏松 | ○ |
| 3# | 板底部覆盖砂浆层粘接不良，自密实混凝土材料也有轻微疏松 | ○ |
| 4# | 存在较为明显发泡层 | ○ |

| | | |
|---|---|---|
| 5# | 从外观观察整体较好 | × |
| 6# | 存在较为明显发泡层，且自密实混凝土材料较为疏松 | ○ |



**照片 3-1-7　各区域揭板照片（从左至右，上 1、2、3，下 4、5、6）**

### 3.1.3 Ⅲ型轨道板施工检测（京沈客专，2016 年 5 月）

1）概述

此次测试对象为京沈客专某梁场的Ⅲ型试验板，对象尺寸为 4.96×2.5×0.2m（长×宽×高），测试了两块对象板，主要针对自密实混凝土灌注效果进行检测。

**图 3-1-8　测试对象照片（轨道板厚 20cm）**

2）测试结果

测试结果表明，

（1）　1#板明显脱空比率 28%，疑似脱空比率 20%，脱空指数：0.38；

（2）　2#板明显脱空比率 4.5%，疑似脱空比率 15%，脱空指数：0.12；

显然，2#板的浇筑质量要优于 1#板。

3）平面成像结果及对比

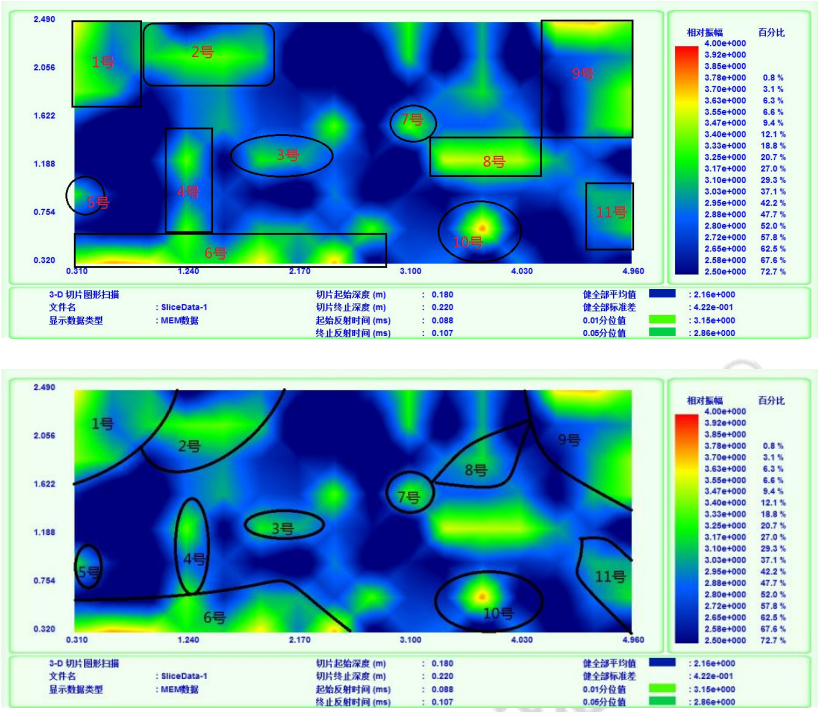



图 3-1-9　1#板测试结果缺陷区域、上图：测试结果，下图：揭板结果

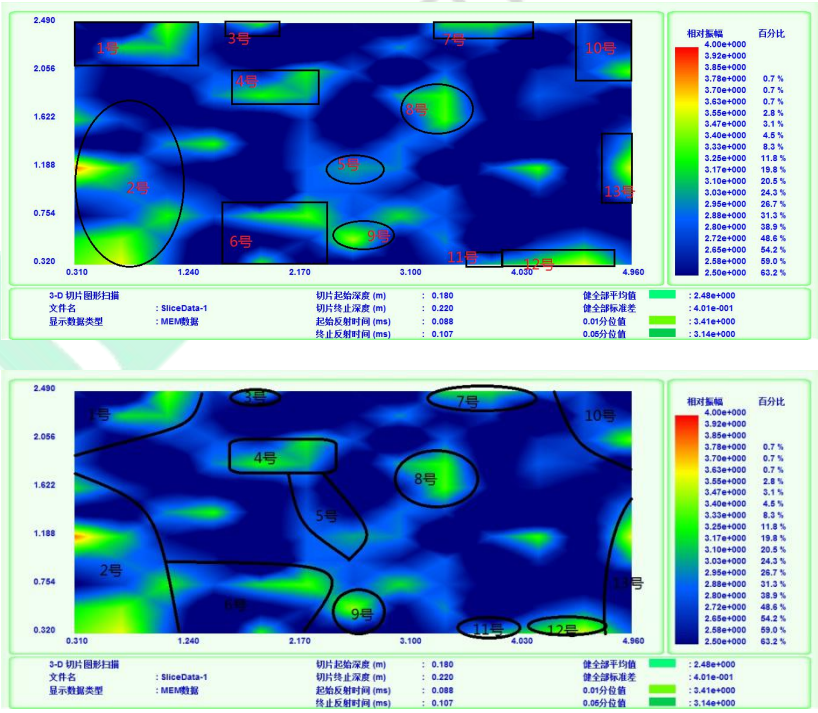



图 3-1-10　2#板测试结果缺陷区域、上图：测试结果，下图：揭板结果

照片 3-1-9　揭板照片（均有大气泡或疏松）

测试结果表明，

（1）　测试效果均较为明显，该方法能有效检测 3 型板的绝大多数病害；

（2）　对揭板后的浇筑状态，特别是是否存在收缩、脱空等需要明确的判定基准；

（3）　1 号实验板和 2 号实验板中存在局部大气泡及发泡区。

### 3.1.4　Ⅲ型轨道板施工检测（济青客专，2016 年 11 月）

1）概述

此次测试对象为济青客专某梁场的Ⅲ型试验板，对象尺寸为 4.96×2.5×0.2m（长×宽×高），测试了 4 块对象板，并进行了揭板对比验证。

照片 3-1-10　测试情景

照片 3-1-11　揭板情景（左：1#板，右：2#板）

**照片 3-1-12　揭板情景（左：3#板，右：4#板）**

2）测试结果

（1）　通过揭板实验表明，4 块实验板中均存在不同程度缺陷，缺陷类型大多以密集型小气泡为主，还有局部为大气泡；

（2）　测试缺陷位置与揭板实际缺陷位置基本一致；

（3）　测试缺陷面积比、脱空指数与揭板估算缺陷面积比有较好的对应关系。

**表 3-1-6　实验板测试结果一览表**

| | 测试脱空面积比（含疑似区域） | 明显脱空 | 疑似脱空 | 揭板估算缺陷面积 | 测试缺陷指数 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 28.40% | 2.8% | 25.6% | 35% | 0.156 |
| 2 | 32.90% | 5.1% | 27.8% | 30% | 0.19 |
| 3 | 38.20% | 3.4% | 34.8% | 40% | 0.208 |
| 4 | 59.20% | 4.6% | 54.6% | 65% | 0.319 |

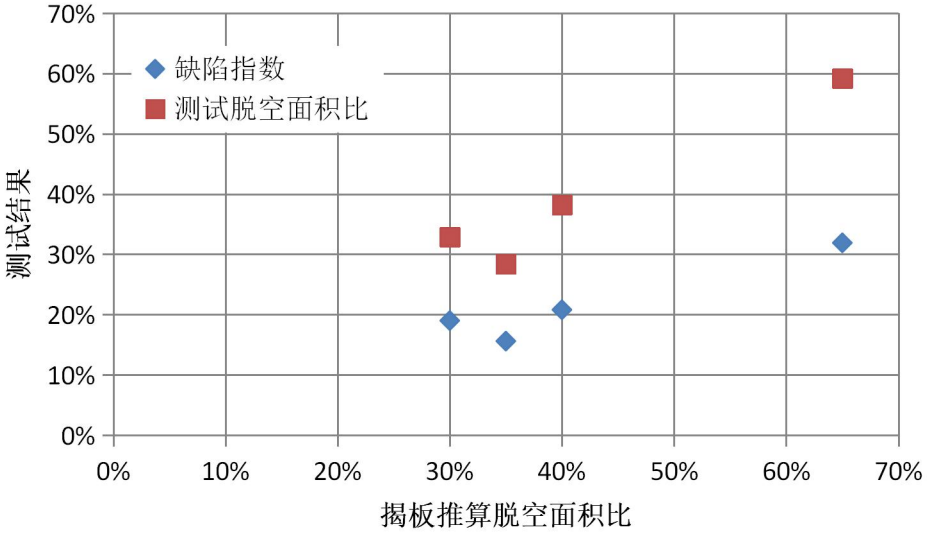



**图 3-1-11　测试结果整体比较**

3）平面成像结果及对比

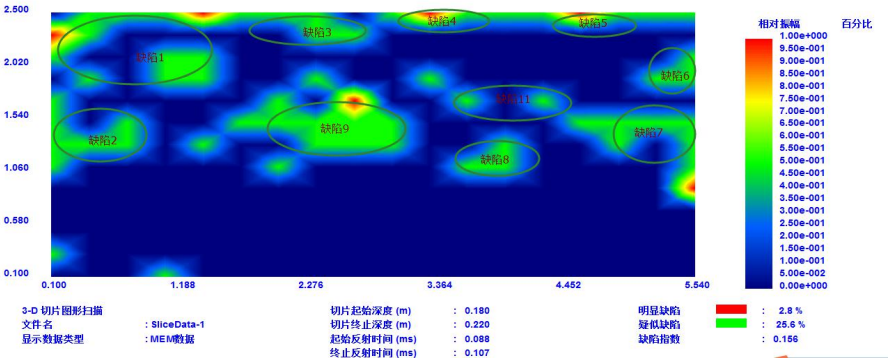



图 3-1-12　1#板测试结果整体比较（图中圆圈为揭板推定缺陷区域）

照片 3-1-13　缺陷处代表情形（左：1#板-1，右：1#板-2）

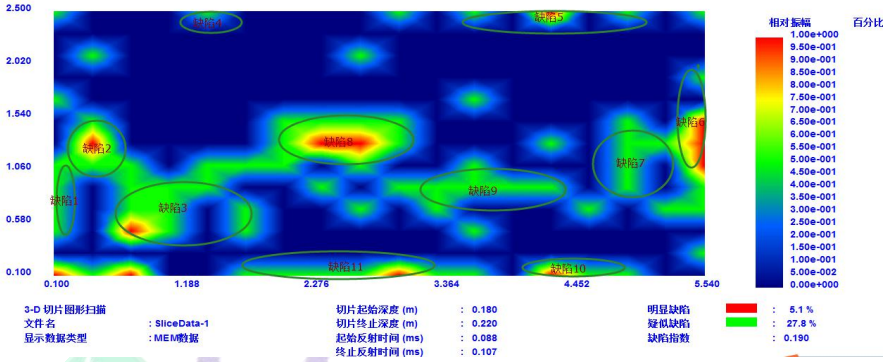



图 3-1-13　2#板测试结果整体比较（图中圆圈为揭板推定缺陷区域）

照片 3-1-14　缺陷处代表情形（左：2#板-1，右：2#板-2）

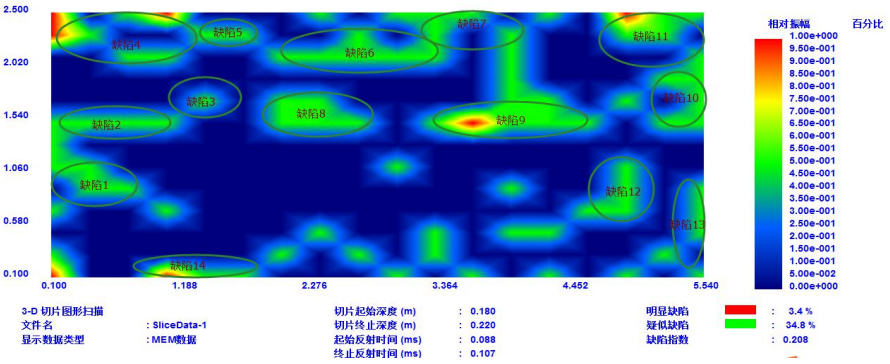
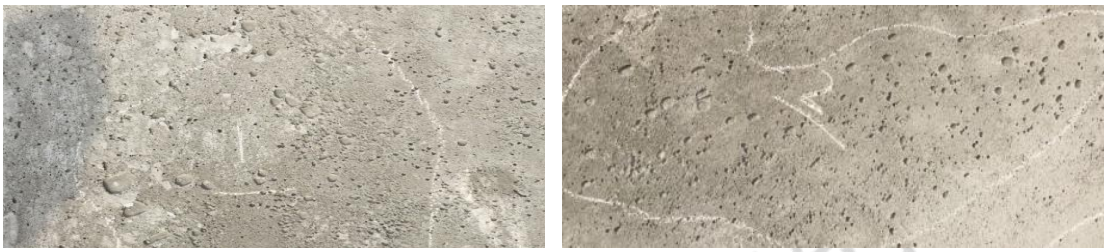



图 3-1-14　3#板测试结果整体比较（图中圆圈为揭板推定缺陷区域）



照片 3-1-15　缺陷处代表情形（左：3#板-1，右：3#板-2）

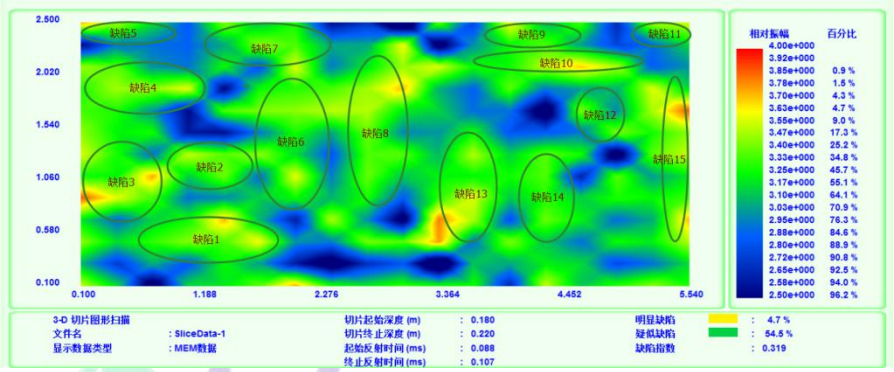



图 3-1-15　4#板测试结果整体比较（图中圆圈为揭板推定缺陷区域）

照片 3-1-16　缺陷处代表情形（左：4#板-1，右：4#板-2）

4）小结

（1）　1～3#板的缺陷主要集中在板的一侧，怀疑与自密实混凝土的灌注方向有关；

（2）　自密实混凝土缺陷的定义还需要统一。

### 3.1.5 Ⅲ型轨道板首件检测（成贵客专，2017 年 02 月）

1）概述

应相关单位邀请，对成贵客专某首件段的轨道板进行了检测及揭板验证试验。

**照片 3-1-17　现场揭板对比验证照片**

2）测试结果

（1）　通过揭板实验表明，2 块实验板中均存在一定程度缺陷；

（2）　缺陷类型大多以密集型小气泡为主，面积超过 6cm$^2$ 的气泡较少；

（3）　测试缺陷位置与揭板实际缺陷位置基本一致；

3）平面成像结果及对比

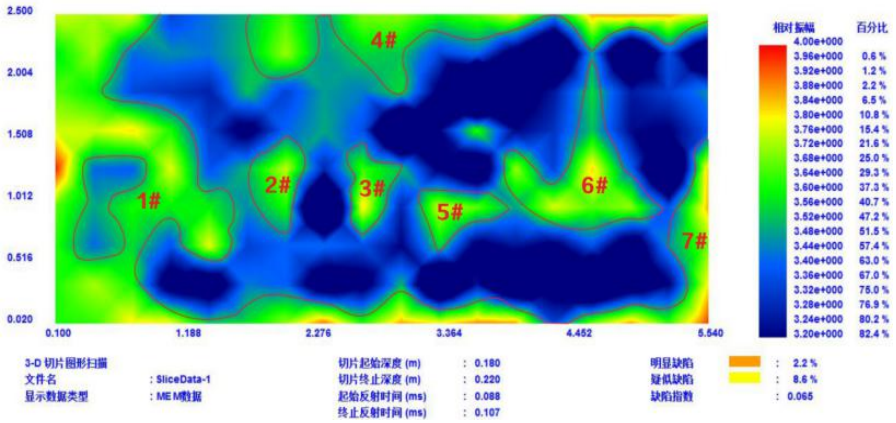


图 3-1-16 上：小里程板测试脱空等值线图，

下：揭板照片（图与照片上下左右对应;）

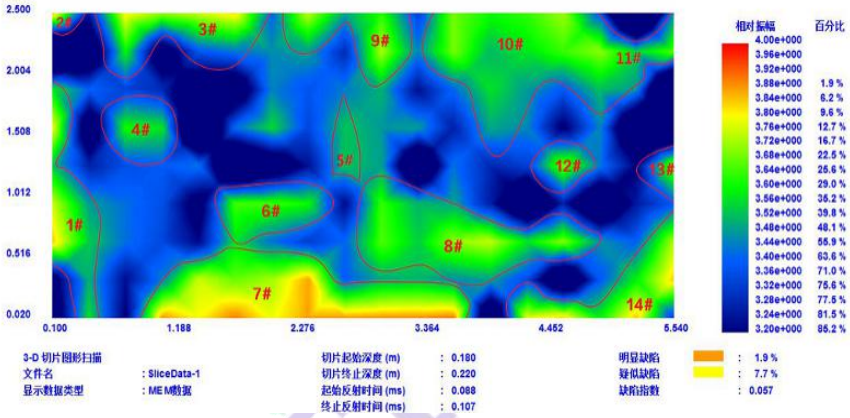


图 3-1-17 上：大里程板测试脱空等值线图，

下：揭板照片（图的左端与照片下端对应）

### 3.1.6 Ⅲ型轨道板检测（商合杭客专，2018 年 07 月）

1）概述

应相关单位邀请，对商合杭客专某标段的轨道板进行了检测及揭板（2 块）试验。

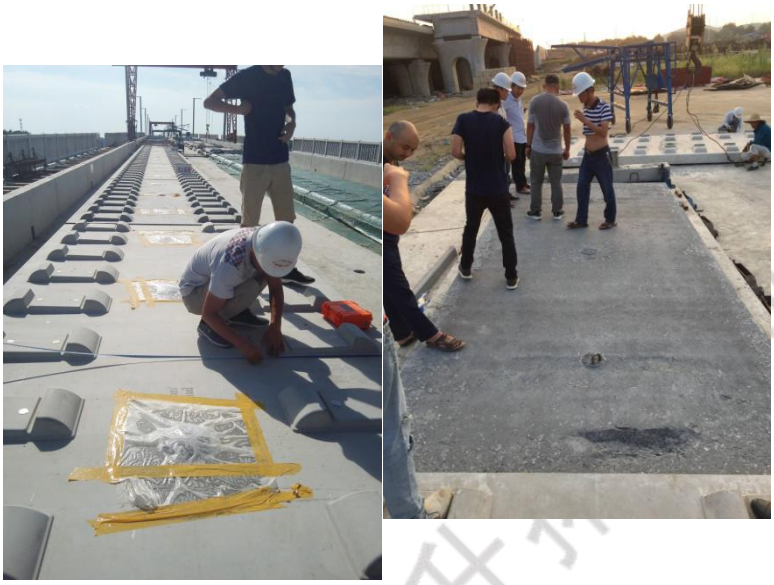


**图 3-1-18 现场测试及揭板情形**

2）测试结果

（1） 揭板实验表明，2 块实验板中均存在一定程度缺陷，特别是边角处蜂窝较多；

（2） 缺陷类型大多以密集型小气泡为主，面积超过 6cm2 的气泡较少，主要集中在注浆口附近（其原因在于为防止揭板困难，施工时注浆孔位置降低了混凝土高度）；

（3） 测试缺陷位置与揭板实际缺陷位置基本一致；

3）平面成像结果及对比

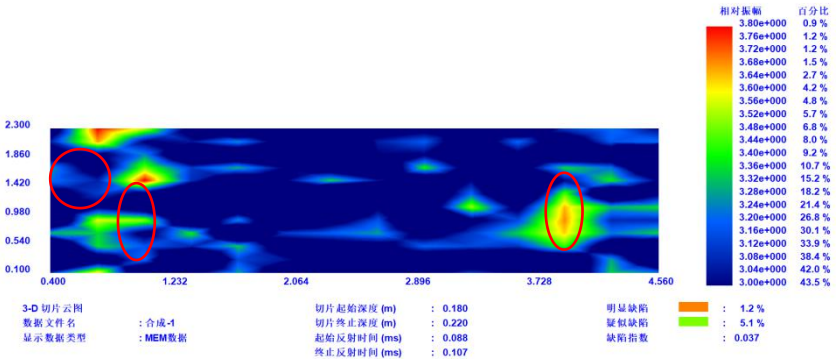



图 3-1-19 1#板测试云图（圆圈为揭板确认的缺陷位置）

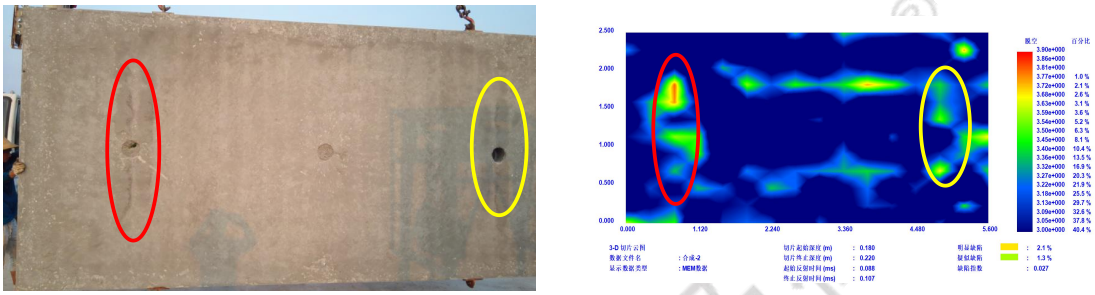


图 3-1-20 2#板测试云图（圆圈为揭板确认的缺陷位置）

### 3.1.7 Ⅲ型轨道板模型验证（山西太原，2019.09）

1）概述

我们对Ⅲ型轨道板模型进行了对比验证。其中，描画设定如下表：

表 3-1-7 描画设定一览表

| | 描画最大值 | 描画最小值 | 明显缺陷阈值 | 疑似缺陷阈值 |
|---|---|---|---|---|
| 幅值分析 | 3.9 | 3.0 | 最大值的 95% | 最大值的 90% |
| 比值分析 | 1.3 | 0.9 | 最大值的 95% | 最大值的 90% |

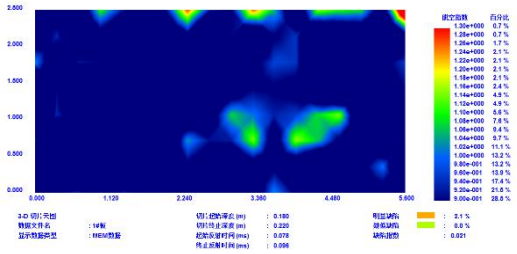
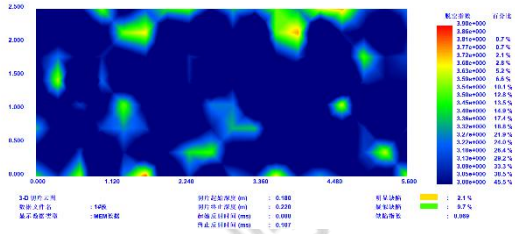
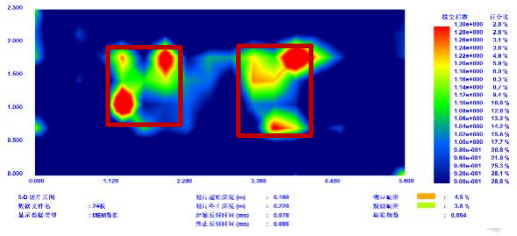
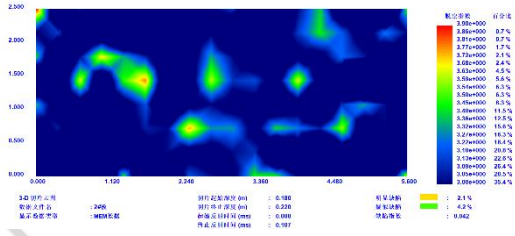
本次试验的两块轨道板模型，以及测试情景如下：

**图 3-1-21　轨道板编号及测试情景**

2）测试结果及预设对比

下表为使用比值法与幅值法的测试对比结果：

**表 3-1-8 模型测试数据对比**

| 描画<br>板号 | 比值 | 幅值 |
|---|---|---|
| 1#板 |  |  |
| 2#板 |  |  |

其中，1#板未预设缺陷，2#板下方自密实混凝土部位预设了四个缺陷（模拟脱空），预设缺陷示意如下图。

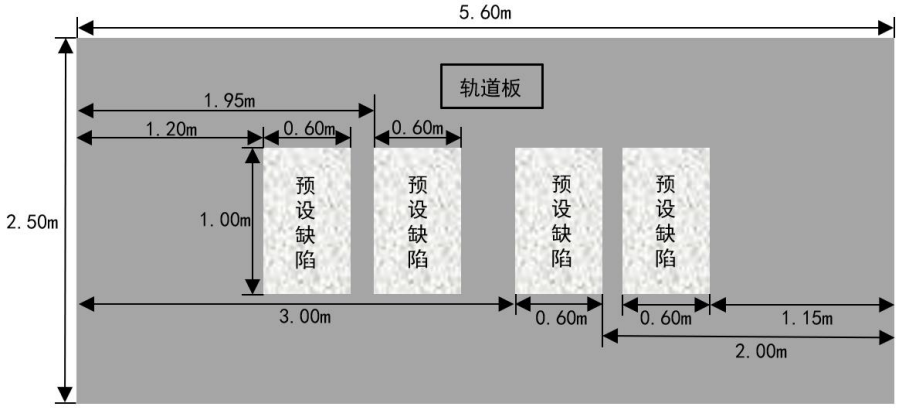



**图 3-1-22　2#板预设缺陷示意图**

比值法的结果中，1 号板仅轨道板边缘位置存在小范围脱空情况，可能与自密实混凝土浇筑质量有关，应属正常情况。2 号板存在明显脱空情况，与预设缺陷位置相符，效果较为理想，明显优于幅值法的结果。

## 3.2现场轨道板验证和应用

### 3.2.1 现场验证及应用（京沪高铁，第一阶段，2016.03～）

应相关部门委托我们在京沪高铁天津南站、德州东站、沧州西站附近进行了测试。

**表 3-2-1 天津南站轨道板测试结果一览表**

| 编号 | 脱空面积 | | 脱空指数 | 缺陷分布 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 明显 | 疑似 | $I_{Pk}$ | 边缘 | 中部 | 整体 |
| 道岔 1-5 | 36.1% | 18.1% | 0.452 | √ | | √ |

**表 3-2-2 德州东站轨道板测试结果一览表**

| 编号 | 脱空面积 | | 脱空指数 | 缺陷分布 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 明显 | 疑似 | $I_{Pk}$ | 边缘 | 中部 | 整体 |
| 道岔 45-54 | 64.2% | 13.5% | 0.710 | | | √ |
| 道岔 64-55 | 59.7% | 20.6% | 0.700 | | | √ |
| 道岔 65-74 | 26.9% | 39.7% | 0.468 | | | √ |
| 道岔 74-65 | 35.0% | 29.6% | 0.498 | √ | | |
| 道岔 84-75 | 21.1% | 35.7% | 0.390 | √ | | |
| 道岔 109-114 | 36.5% | 9.0% | 0.410 | √ | | |
| 道岔 115-119 | 48.6% | 11.2% | 0.542 | | | √ |
| 道岔 120-125 | 53.8% | 15.2% | 0.614 | | | √ |

**表 3-2-3 沧州西站轨道板测试结果一览表**

| 编号 | 脱空面积 | | 脱空指数 | 缺陷分布 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 明显 | 疑似 | $I_{Pk}$ | 边缘 | 中部 | 整体 |
| 道岔 8-15 | 59.6% | 12.1% | 0.657 | | | √ |

典型的测试云图如下所示。

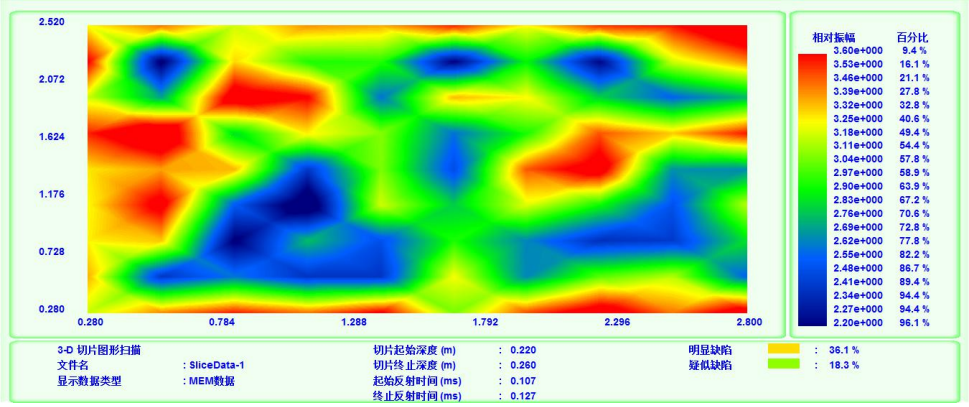



图 3-2-1 道岔测试结果

### 3.2.2 重复性验证（ZF 高铁，2019.06）

1）对比试验一

对某工地 S201-164 轨道板，采用比值法和幅值法对测试结果的重复性进行了对比。

图 3-2-2 比值法解析结果（描画值：0.9～1.3 波速：4.6）

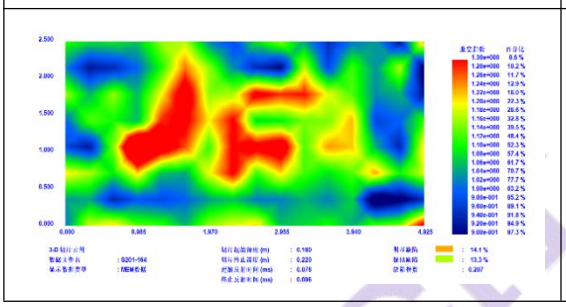
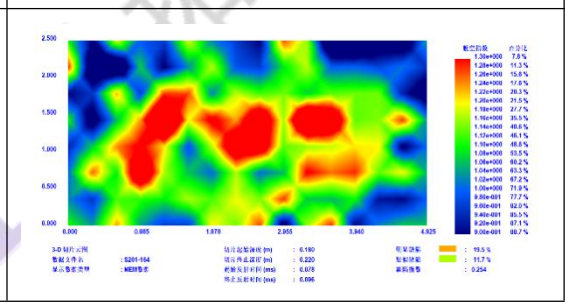
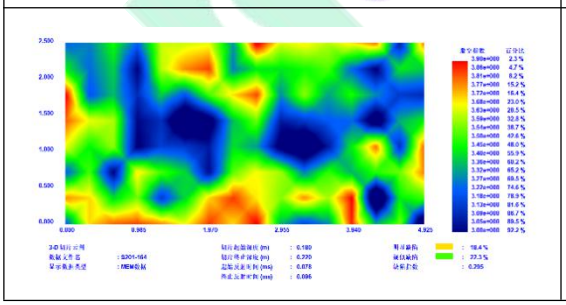
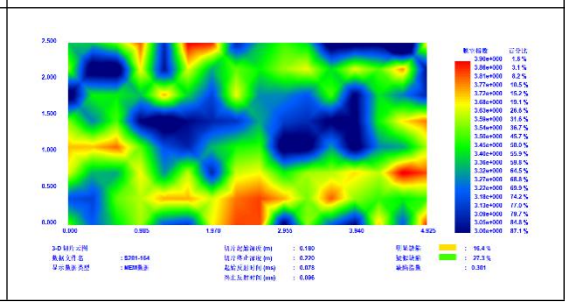
| 第一次测试 | 第二次测试 |
|---|---|
|  |  |

图 3-2-3 幅值法解析结果（描画值：3.0～3.9 波速：4.6）

| 第一次测试 | 第二次测试 |
|---|---|
|  |  |

2）对比试验二

为验证不同传感器对测试结果的影响，我们在某现场 X088-172 板进行了对比试验。

图 3-2-4 比值法相同传感器解析结果（描画值：0.9～1.3 波速：4.6）

| 第一次测试（传感器 1） | 第二次测试（传感器 1） |
|---|---|

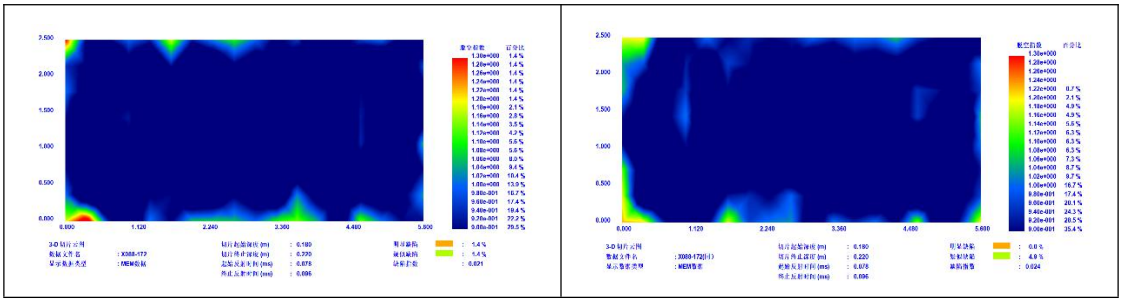


图 3-2-5 比值法不同传感器解析结果（描画值：0.9～1.3　波速：4.6）

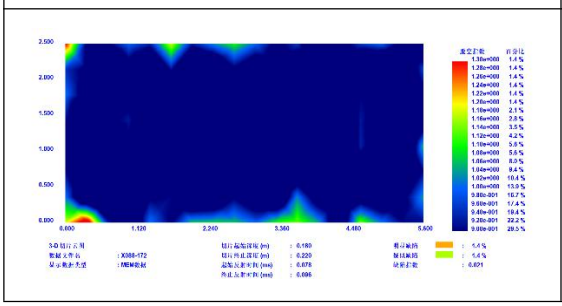
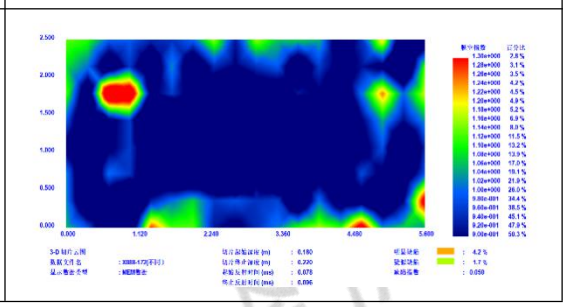
| 第一次测试（传感器 1） | 第二次测试（传感器 2） |
| --- | --- |
|  |  |

图 3-2-6 幅值法相同传感器解析结果（描画值：3～3.9　波速：4.6）

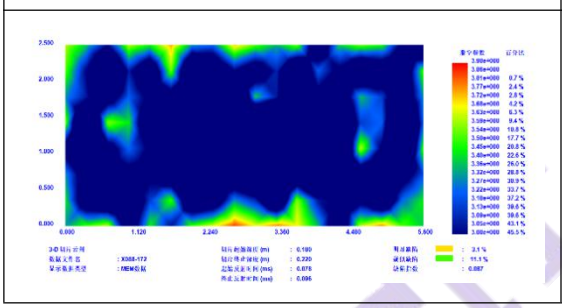
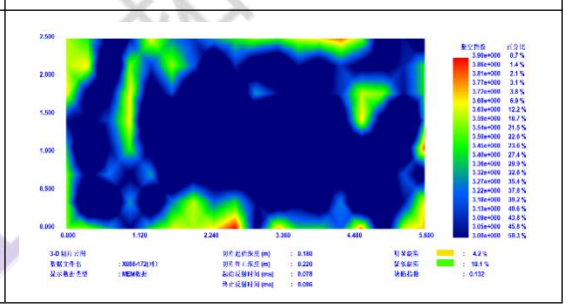
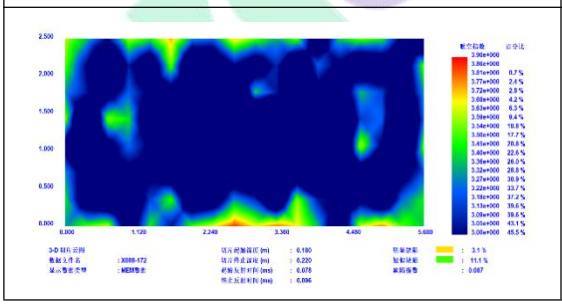
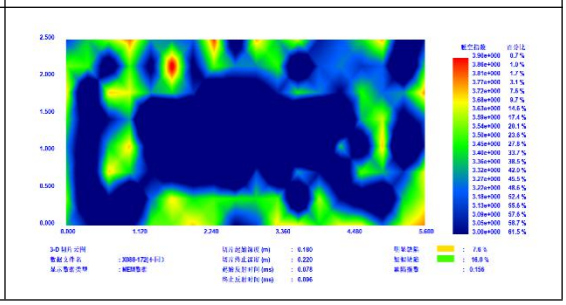
| 第一次测试（传感器 1） | 第二次测试（传感器 1） |
| --- | --- |
|  |  |

图 3-2-7　幅值法不同传感器解析结果（描画值：3～3.9　波速：4.6）

| 第一次测试（传感器 1） | 第二次测试（传感器 2） |
| --- | --- |
|  |  |

3）小结

比值法的整体重复性优于幅值法。

### 3.2.3　Ⅲ型轨道板检测（ZF 客专，2019 年 03～06 月）

1）概述

应相关单位邀请，对 ZF 客专多个标段的轨道板进行了检测及外观（插尺法）对应试验，结果吻合程度高。

2）检测及对应结果

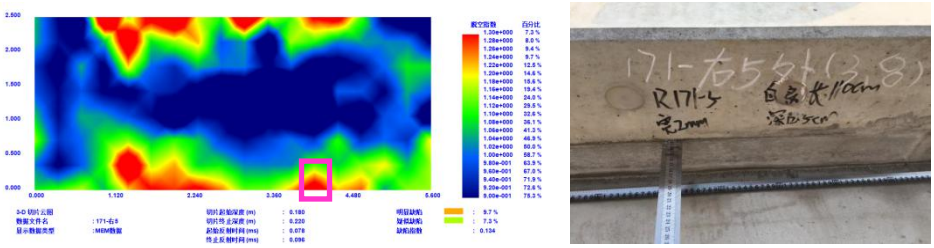


图 3-2-8 171-右 5（右为插尺确认的缺陷位置）

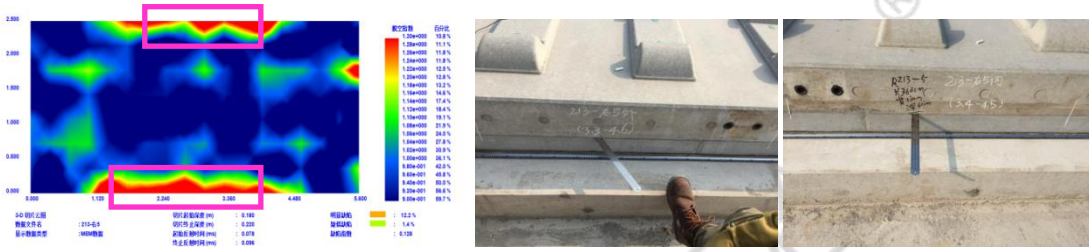


图 3-2-9 213-右 5（右为插尺确认的缺陷位置）

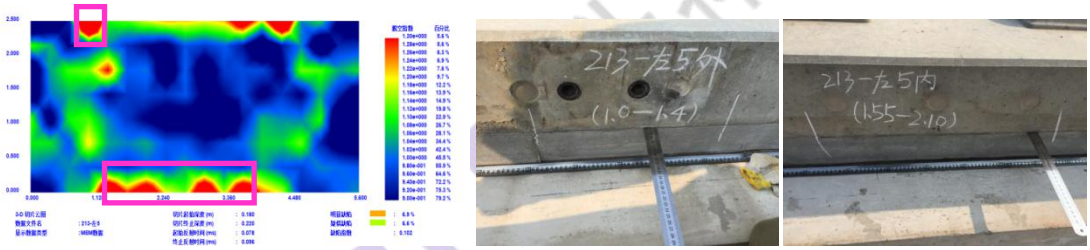



图 3-2-10 213-左 5（右为插尺确认的缺陷位置）

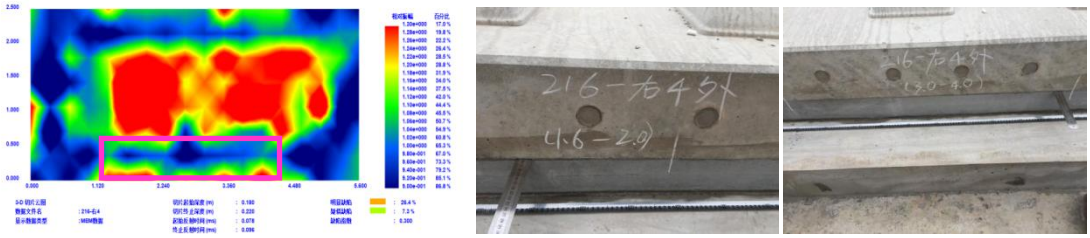



图 3-2-11 216-右 4（右为插尺确认的缺陷位置）

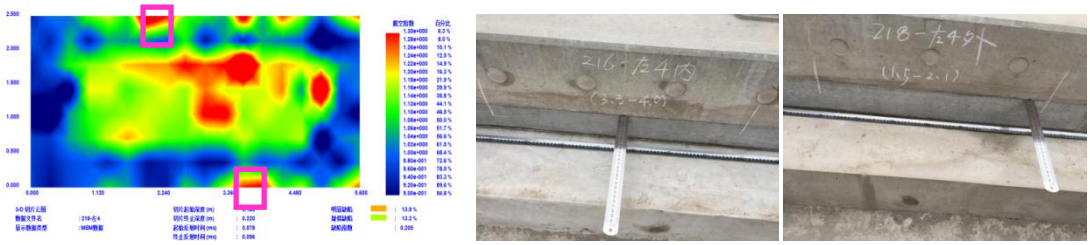


图 3-2-12 218-左 4（右为插尺确认的缺陷位置）

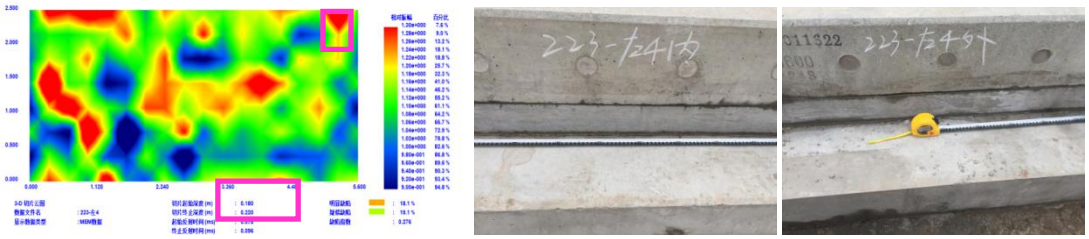


图 3-2-13 223-左 5（右为插尺确认的缺陷位置）

### 3.2.4 道岔板脱空整体特征分析

期间，我们对检测的道岔板的脱空情况进行了统计（截至 2017.08，共计 119 块）。

表 3-2-4 道岔板脱空情况一览表

| 脱空指数范围 | 板数 | 占比 | 脱空指数范围 | 板数 | 占比 |
|---|---|---|---|---|---|
| 0.00～0.40 | 13 | 10.92% | > 0.40 | 89.08% | 106 |
| 0.40～0.50 | 11 | 9.24% | > 0.50 | 79.83% | 95 |
| 0.50～0.60 | 42 | 35.29% | > 0.60 | 44.54% | 53 |
| 0.60～0.70 | 46 | 38.66% | > 0.70 | 5.88% | 7 |
| 0.70～1.00 | 7 | 5.88% | | | |
| 总　数 | 119 | | 总　数 | 119 | |

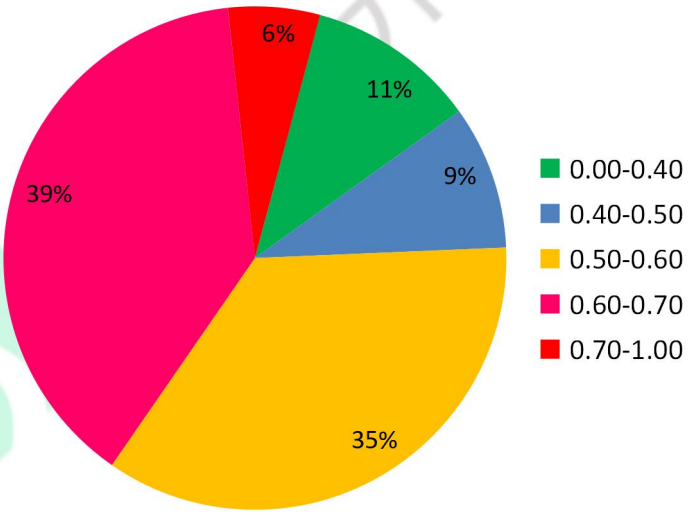



图 3-2-4 京沪高铁轨道板/道岔脱空检测结果分布

检测结果表明：

（1） 脱空指数高于 0.5 的道岔板的占比达到了 79.8%；

（2） 相当部分轨道板呈现整体脱空形态，表明经过夏季和冬季的正负温度梯度后，轨道板与调整层/底座板间已经大部分脱离，并可能已产生整体滑移；

（3） 整体脱空指数小于 0.5 的轨道板脱空均集中在边缘，符合冬季夜间负温度

梯度的特征；

## 3.3 修补效果确认检测

### 3.3.1 现场应用（京沪高铁，2015.10）

我们在京沪高铁的蚌埠某站附近的道岔板，对注胶效果进行了检测和确认。

1）10 号道岔承轨台（编号 120-125）

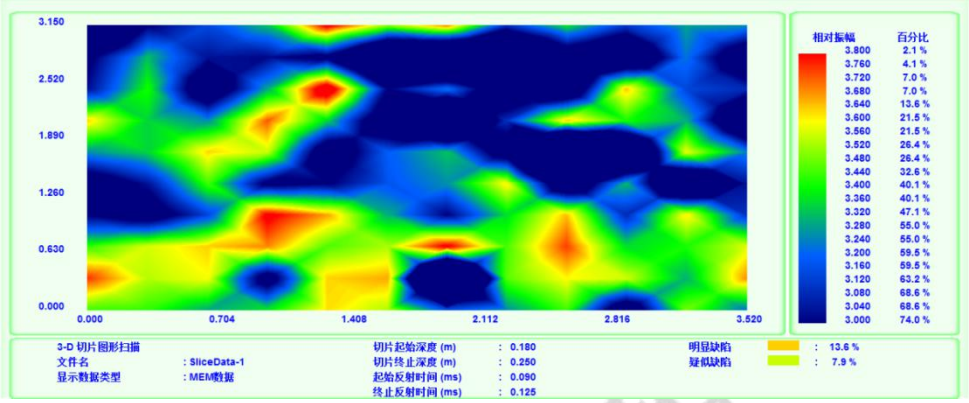



图 3-3-1 注胶前（明显缺陷 13.6%，疑似缺陷 7.9%）

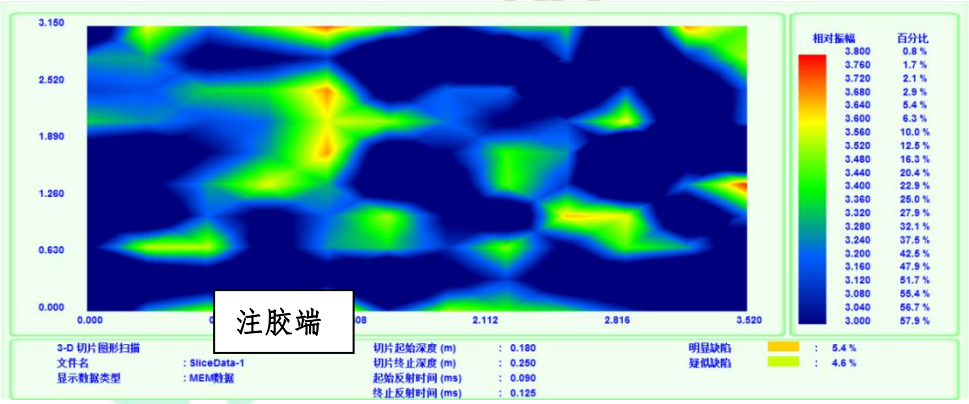



图 3-3-2 注胶后（明显缺陷 5.4%，疑似缺陷 4.6%）

2）10 号道岔承轨台编号 109-114

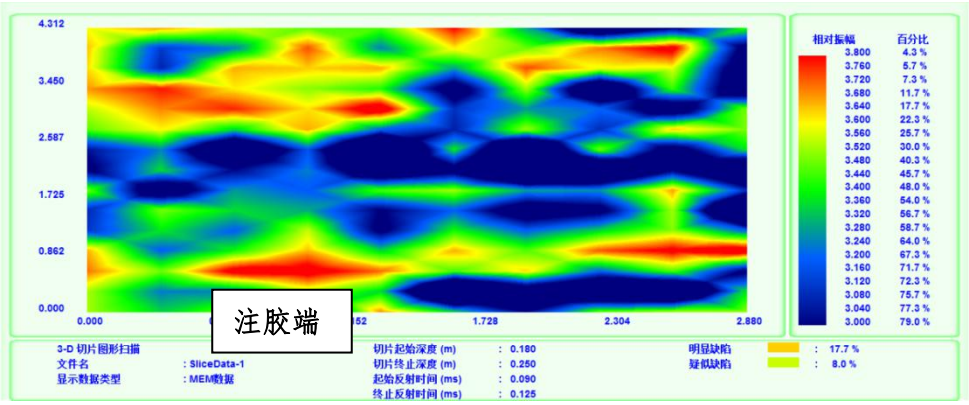



图 3-3-3 注胶后（明显缺陷 17.7%，疑似缺陷 8.0%）

3）8 号道岔承轨台（编号 139-131）

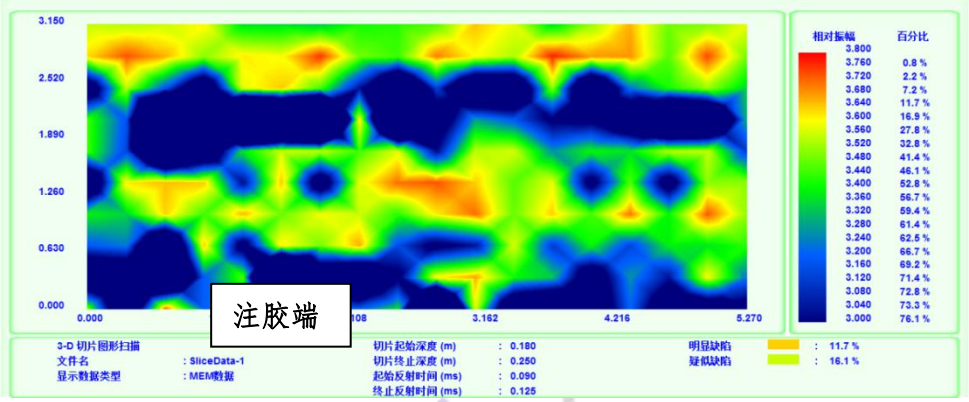



图 3-3-4 注胶后（明显缺陷 11.7%，疑似缺陷 16.1%）

4）8 号道岔承轨台（编号 273-268）

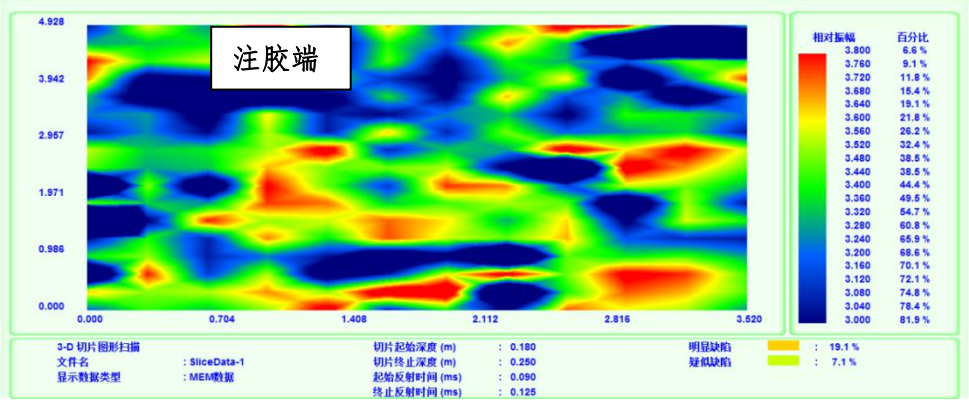



图 3-3-5 注胶后（明显缺陷 19.1%，疑似缺陷 7.1%）

测试结果表明，

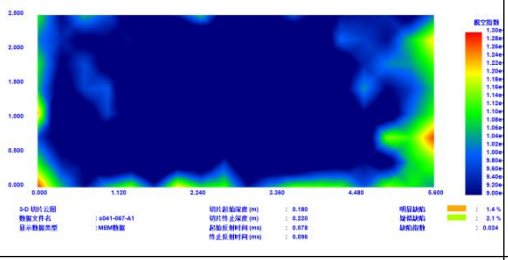
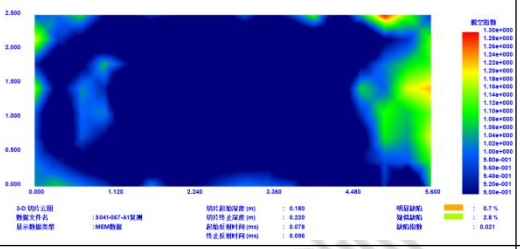
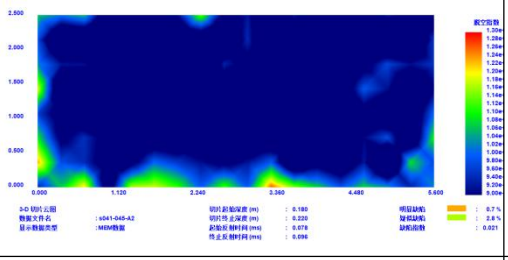
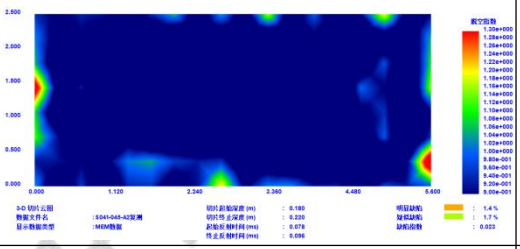
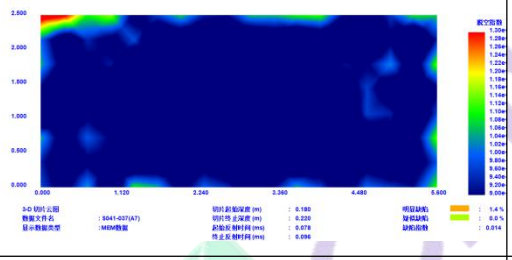
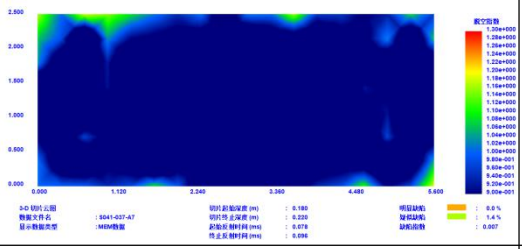
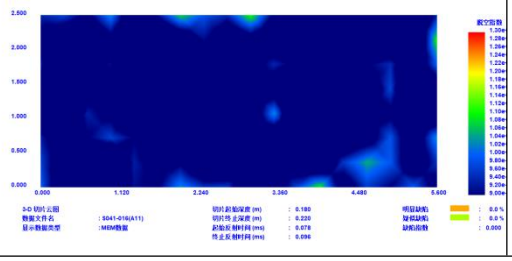
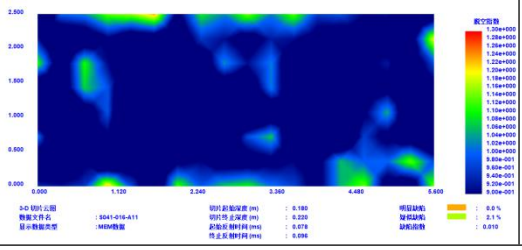
（1） 注胶有一定的效果；

（2） 单端注胶时，远端的效果相对较差；

### 3.3.2 现场应用（ZF 客专，2019.03-05）

在 ZF 客专的多个梁场，对注胶效果进行了检测和确认。以下为使用比值法切片的对比结果：

**表 3-3-1 注浆前后的结果对比**

| 板号 | 注浆前 | 注浆后 | 备注 |
|---|---|---|---|
| SX-067 |  |  | 注浆后脱空面积减少 |
| S041-045 |  |  | 注浆后脱空面积减少 |
| SXX-037-A7 |  |  | 注浆后脱空面积减少 |
| SXX-016-A11 |  |  | 注浆后脱空面积增加 |

结果表明：

（1） 大部分轨道板在经过注浆处理后，脱空的面积较注浆前有减少；

（2） 有个别轨道板在注浆后脱空面积反而增加的情况，可能与注浆工艺有关；

（3） 使用比值法切片的结果也和实际情况较为接近，结果可靠。

### 3.3.3 现场应用（ZF 客专，2019.06）

1）概述

为验证比值法和老幅值法对补浆效果检测的可靠性，对某脱空明显的轨道板进行了检测，并与注胶情形进行了对比。

**图 3-3-6　检测现场实际情况**

经现场检测发现该轨道板的 8#测线段存在明显脱空，现场用钢尺量取发现，最深可达 23cm 左右，最浅处有 2cm 左右。

2）检测结果

**表 3-3-2 比值法解析结果（描画值：0.9～1.3　波速：4.6）**

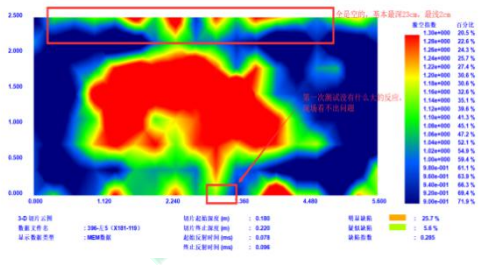
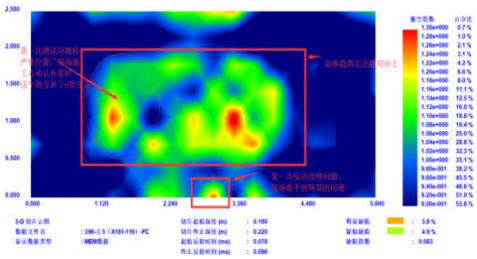
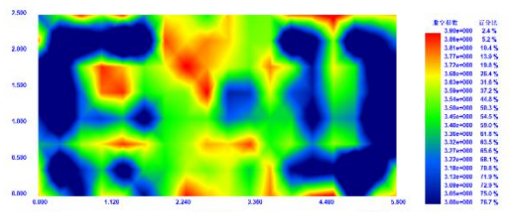
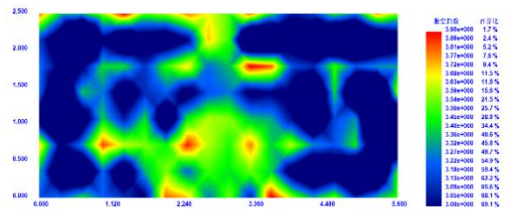
| | 第一次测试（补浆前） | 第二次测试（补浆后） |
|---|---|---|
| 云图 |  |  |
| 说明 | 补浆前发现第 8#测线处于完全脱空状态，最深处达 22cm 左右，最浅处达 2cm 左右，测试结果和现场情况吻合；轨道板中部存在严重脱空情况。 | 补浆后测试发现中部区域仍存在脱空，但得到明显的改善。据施工方现场描述：在距第一个测点 1～2m 的地方补浆最多，大约补浆 6 管左右，与测试结果吻合。 |

表 3-3-3 幅值法解析结果（描画值：3～3.9　波速：4.6）

| 第一次测试（补浆前） | 第二次测试（补浆后） |
| --- | --- |
|  |  |

3）小结

比值法和幅值法均能反应出现场的明显缺陷位置，但是比值法的反应更加切合现场实际。

### 3.3.4 道岔板脱空修补效果检测（某铁路局，2020.10-12）

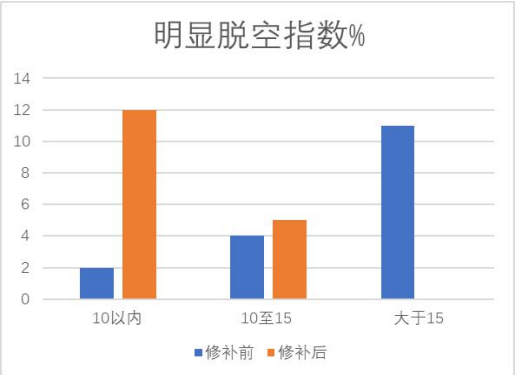
1）概述

受施工单位委托，我公司采用冲击回波法对 ZJ 南、CZ 北、WX 东、WD 站道岔板脱空，以及道岔板修补（注胶）效果进行了检测和确认。

图 3-3-7　现场检测

图 3-3-8　修补前后现场对比

2）检测统计结果



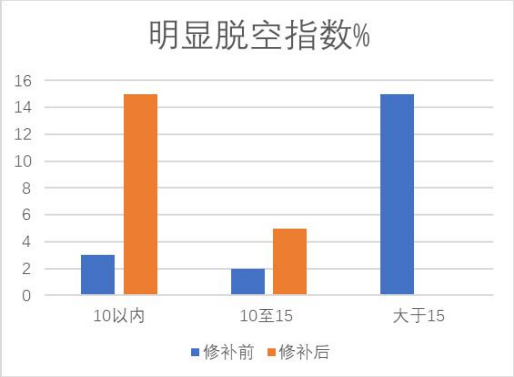
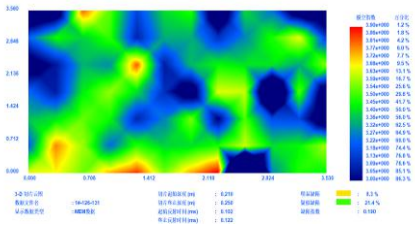
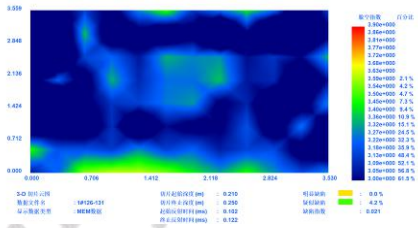
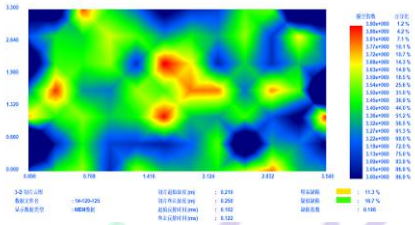
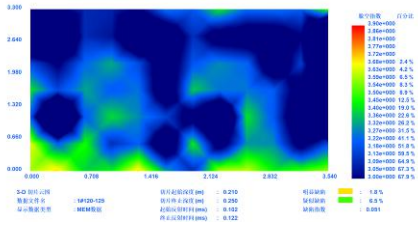
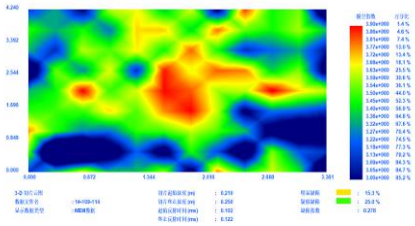
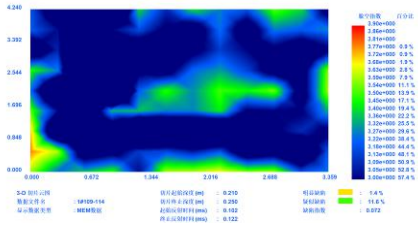
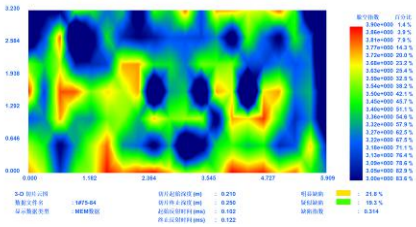
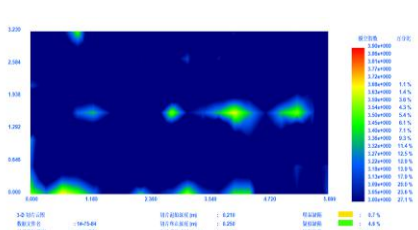




**图 3-3-9　修补前后明显脱空比例统计图**

可见，整治后的检测脱空指数明显降低，基本未出现脱空指数大于 15%的情况。

**表 3-3-4　CZ 北道岔板检测结果表**

| 序号 | 修补前检测结果 | 修补后检测结果 | 备注 |
|---|---|---|---|
| 1 |  |  | / |
| 2 |  |  | / |
| 4 |  |  | / |
| 9 |  |  | / |

# 第 3 章 展望

轨道板的脱空检测是一个崭新的，而又是十分困难的课题。因而我们开发的检测设备也存在诸多的不足之处。其中，最大的不足之处在于测试效率尚不十分理想。

目前，测试一块轨道板的标准测点数为 160 测点，一组（2 人）的测试时间大致需要 20 分钟左右。考虑到轨道板的庞大数量，如何在保证检测精度的同时，尽可能地提高检测效率显然是十分必要的。

目前，影响检测效率的主要因素在于传感器的固定方式。在现有方式下，要求

（1） 传感器与被测面密切接触；

（2） 在激振时传感器处于静止状态。

目前，影响检测效率的主要因素在于传感器的固定方式。要想大幅度地提高测试效率，就需要对传感器的固定方式进行相应的改进。而改进传感器的固定方式主要有一下几条路径，即：

（1） 采用专用支座及自动激振

（2） 多点阵列式传感器矩阵；

（3） 采用非接触式的拾音器；

这几种方式各有优劣，但均需要大量的开发和验证。

目前，我们正在开发和改进传感器的专用支座和自动激振装置，并在现场试验性的使用。

升拓检测 ®

# 结语与致谢

最后，衷心向各位合作伙伴以及为本文提供了宝贵资料的：

京沪高速铁路股份有限公司

上海铁路局

郑州铁路局

西南交通大学

中国冶金建筑设计研究总院

中交二航局

中铁十一局集团有限公司

中铁十九局集团有限公司

中铁十八局集团有限公司

中国铁道科学研究院

北京铁路局

中铁三局集团有限公司

铁道第四勘察设计研究院

沈铁检测中心

郑万客专河南有限责任公司

山西省交通职业技术学院

以及关心、支持我们的各位朋友表示诚挚的谢意！

CIT 升拓检测®

# 参考文献

[1] 吴佳晔、谢永江等：基于弹性波的无砟轨道板脱空无损检测方法[P].中华人民共和国发明专利，专利号：ZL 2015 1 0170451.4。

CIT 升拓检测®

# 版本修订说明

V1.13： 由原“SCIT-1-TEC-02A-2016-结构脱空检测技术体系”改编；

V1.15： 增加了无损检测及揭板对比案例（济青客专，3.1.4）

V1.16： 增加了无损检测及揭板对比案例（成贵客专，3.1.5）

V1.17： 增加了道岔板脱空检测统计资料（道岔板脱空整体特征分析 3.2.3）

V1.18： 增加了Ⅲ型轨道板检测验证案例（商合杭客专，3.1.6）

V1.19： 增加了检测精度和稳定性的提高（2.1.7）

V1.20： 增加了现场验证（3.1.7、3.3.2），修订了检测精度和稳定性的提高（2.1.7）

V1.21： 增加了现场应用（3.3.3），修订了重复性验证（3.2.2）

V1.22： 增加了Ⅲ型轨道板模型验证（3.1.7），将原 3.1.7 调整为 3.2.3

V1.23： 增加了道岔板修补效果确认应用（3.3.4）

SCIT 升拓检测 ®

# 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


CIT 升拓检测®