

CRTSIII型板式无砟轨道伤损检测技术

(V1.26)



2013-11-08 初稿

2020-02-23 第 21 次修订

2021-02-23 第 22 次修订

2022-02-12 第 23 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 III 型轨道板脱空检测	4
2.1 技术基础	4
2.1.1 检测对象	4
2.1.2 检测方法概述	5
2.1.3 激振频率的选取	5
2.1.4 其他影响因素	5
2.1.5 III 型板激振锤选取及脱空判定阈值的设定	6
2.1.6 脱空判定及评价	6
2.1.7 检测精度和稳定性的提高	6
2.2 轨道板修补效果检测	7
2.2.1 修补材料脱空的模型	8
2.2.2 修补材料脱空的判定阈值	8
2.3 基于板振动理论的离缝深度检测	8
第 3 章 模型试验及现场验证	8
3.1 模型试验	8
3.1.1 室内轨道板模型（中国铁道科学研究院，2014.03）	8
3.1.2 III 型轨道板施工检测（京沈客专，2016 年 5 月）	11
3.1.3 III 型轨道板首件检测（成贵客专，2017 年 02 月）	12
3.1.4 III 型轨道板检测（商合杭客专，2018 年 07 月）	14
3.2 现场轨道板验证和应用	15
3.2.1 重复性验证（郑阜高铁，2019.06）	15
3.2.2 III 型轨道板检测（郑阜客专，2019 年 03~06 月）	16
3.2.3 道岔板脱空整体特征分析	16
3.2.4 III 型轨道板揭板验证（赣深铁路、2021.05）	17
3.3 修补效果确认检测	18
3.3.1 现场应用（郑阜客专，2019.06）	18
3.3.2 道岔板脱空修补效果检测（上海铁路局，2020.10-12）	20
第 4 章 展望	22
结语与致谢	23

第 1 章 概述

2008 年我国开通了首条高速铁路京津城际,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, CRTS III 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。

CRTS III 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。

CRTS III 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-CRTS II 型轨道板伤损检测技术体系(公司技术资料)。

第 2 章 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 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 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

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；

2.1.2 检测方法概述

- 1) 轨道板脱空检测采用冲击回波法（IE 法），基本原理等与 CRTS II 型板的检测相同，相关资料参见：冲击弹性波检测技术基本原理、混凝土材料及结构综合检测技术体系、结构脱空检测技术体系、CRTS II 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。

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。

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 $\pm 10\%$ 。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

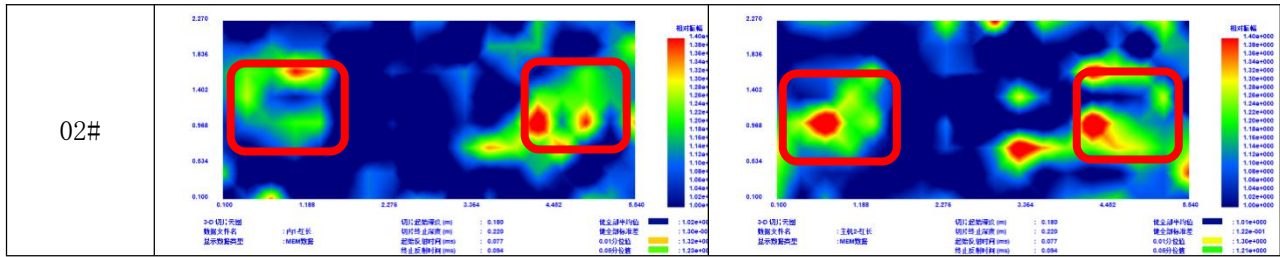
脱空判定的方法与Ⅱ型板相同，所不同的是其脱空阈值可适度上调。

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



可以看出，无论是缺陷位置（均在图中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 方法数据	幅值分析		比值分析	
	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。

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 $0.2 \sim 0.4 \text{ GPa}$ ，温度高时模量低，密度在 $35 \sim 40 \text{ kg/m}^3$ ，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 $17 \sim 18 \text{ GPa}$ ，密度在 $1700 \sim 2300 \text{ kg/m}^3$ ，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 $1 \sim 5 \text{ mm}$ 左右，与轨道板的翘曲模式、注胶压力等有关。

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。

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 3 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）

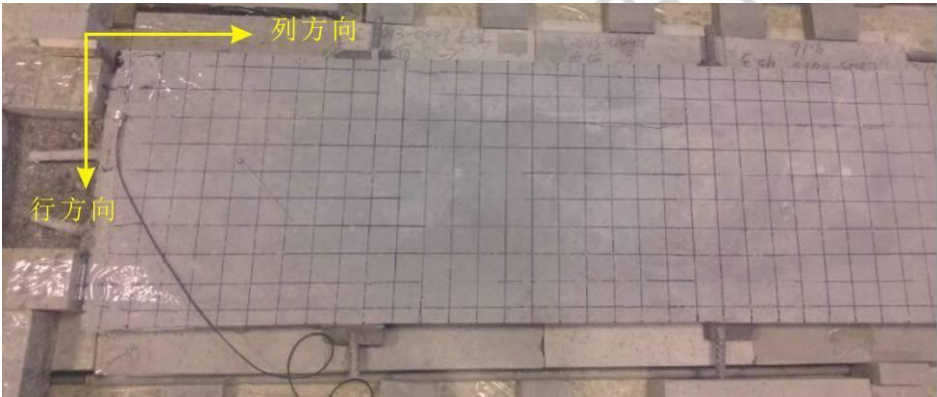
1) 概述

测试对象为 $1.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.07 \text{ m}$ 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 0.05 m ，每行之间（列方向）的间隔也为 0.05 m 。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)
--	-------------------------------

CRTS III 型板式无砟轨道伤损检测技术体系

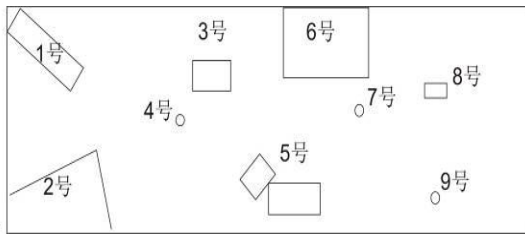
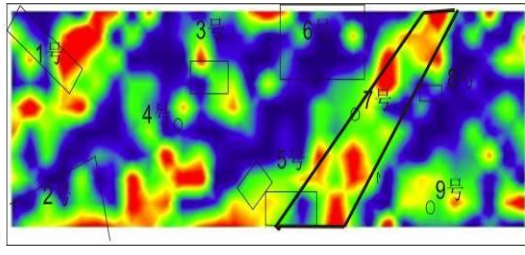
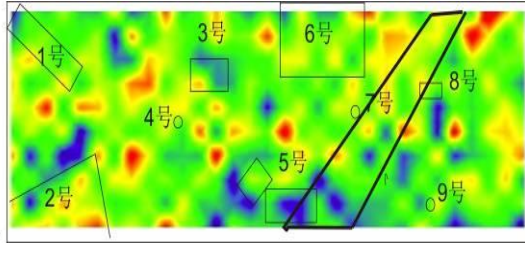
	1 号板缺陷设置示意图及缺陷自编号
	该图为 IE（冲击回波法）分析结果。 该图为顶板与灌浆体交界面聚焦扫面图。图中红色和黄色表明该处存在脱空，红色脱空可能性更大；
	该图为 IEEV（等效波速法）分析结果。 该图为底板界面聚焦扫面图。图中，蓝色区域表明弹性波反射信号迟延，表明该处存在脱空可能性。

表 3-1-2 1 号实验板缺陷检测情况表

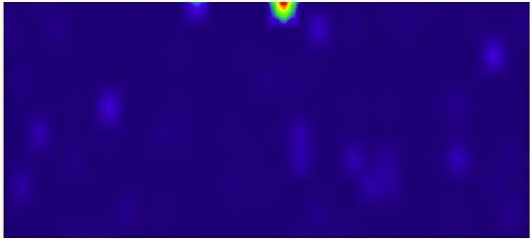
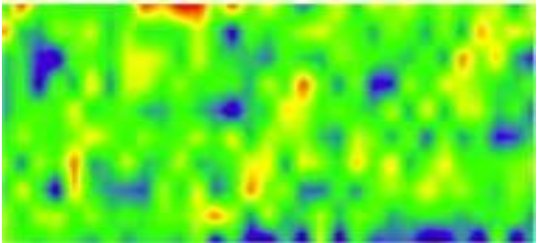
缺陷编号	对应	IE	IEEV	说明
1 号缺陷	○	√		缺陷尺寸和形态有所差异，检测结果尺寸偏大
2 号缺陷	○	√		缺陷形态基本一致，检测结果尺寸偏大
3 号缺陷	◎	√	√	形态大小基本和设计一致
4 号缺陷	◎	√		形态尺寸和设计基本一致
5 号缺陷	○	√	√	检测结果形态和实际有差异，检测区域尺寸偏大
6 号缺陷	△	√	√	基本测出，但大小与设计相差较大
7 号缺陷	△	√		形态不明（被其他区域覆盖）
8 号缺陷	◎	√		形态尺寸基本和设计一致
9 号缺陷	○	√	√	IE 形态和尺寸偏大，等效波速法和实际基本一致。
黑色框内	◎	√	√	明确地反映了自密实混凝土缺陷的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

◎：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 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。 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。 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（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

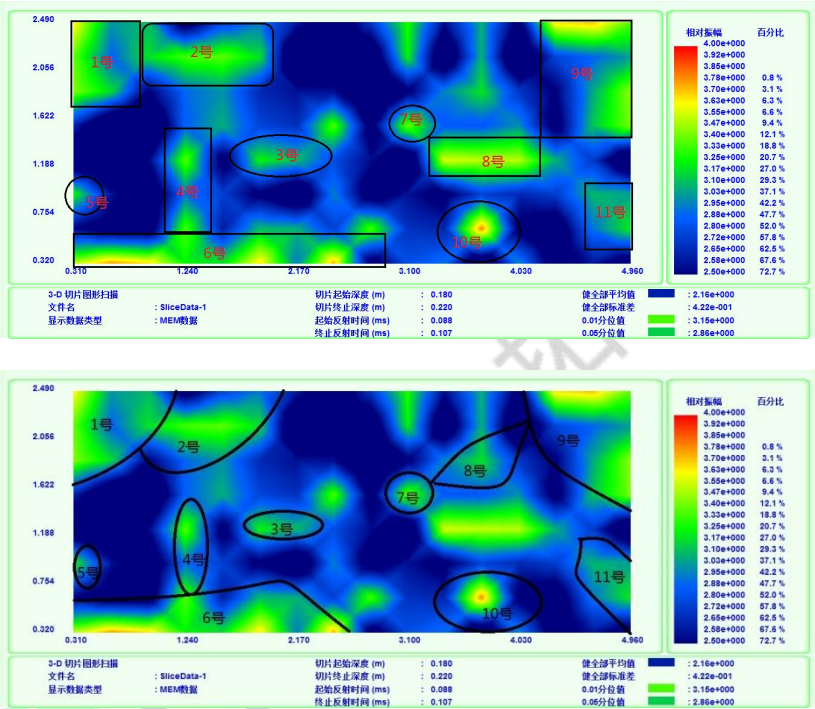


图 3-1-9 1#板测试结果缺陷区域、上图：测试结果，下图：揭板结果

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。

3.1.3 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

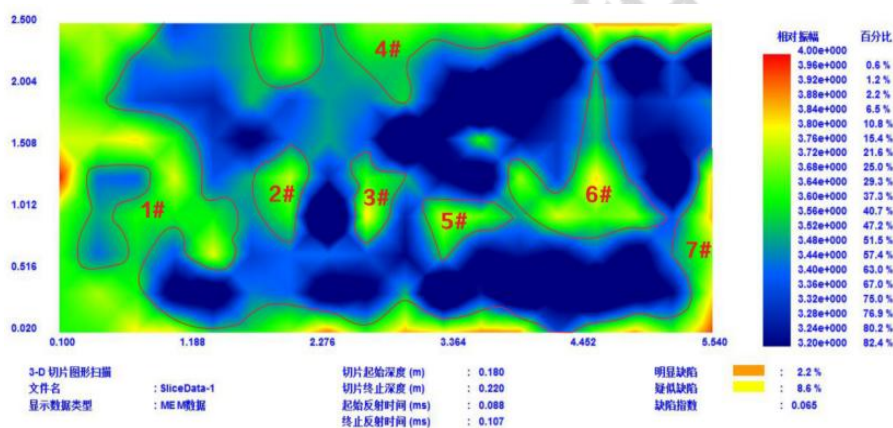


图 3-1-16 上：小里程板测试脱空等值线图，

3.1.4 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。

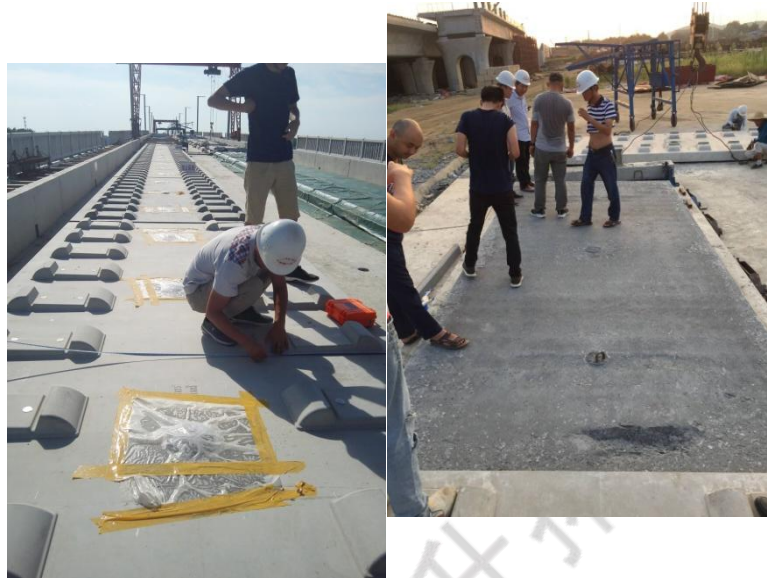


图 3-1-18 现场测试及揭板情形

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

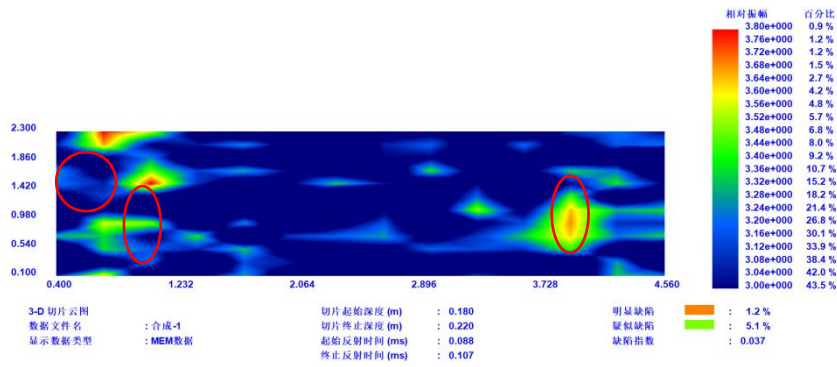


图 3-1-19 1#板测试云图（圆圈为揭板确认的缺陷位置）

3.2 现场轨道板验证和应用

3.2.1 重复性验证（郑阜高铁，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）

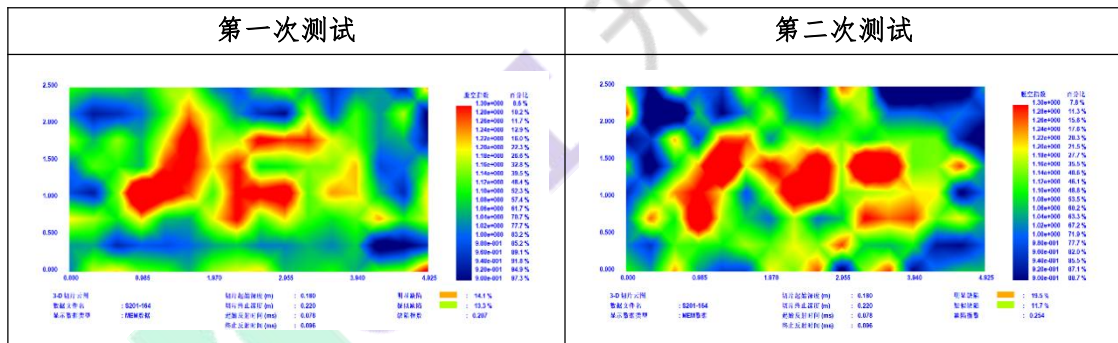
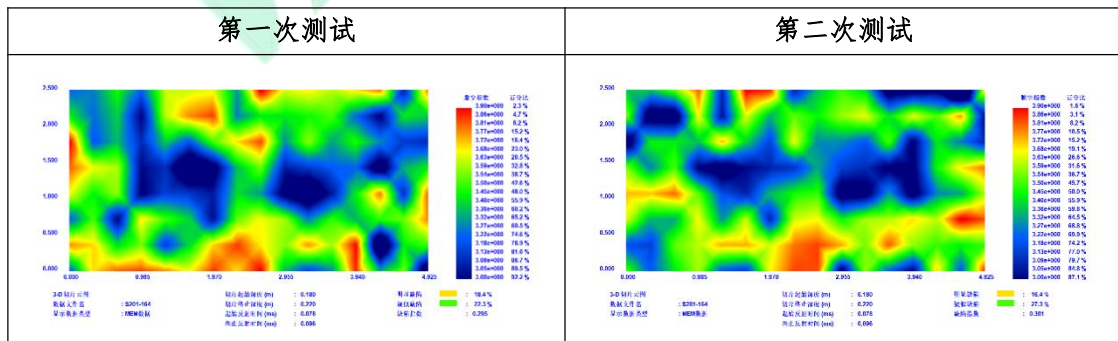


图 3-2-3 幅值法解析结果（描画值：3.0~3.9 波速：4.6）



2) 小结

比值法的整体重复性优于幅值法。

3.2.2 Ⅲ型轨道板检测（郑阜客专，2019 年 03～06 月）

1) 概述

应相关单位邀请，对郑阜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

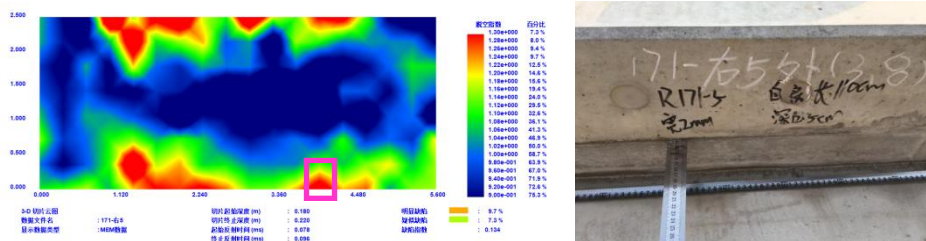


图 3-2-8 171-右 5（右为插尺确认的缺陷位置）

3.2.3 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	

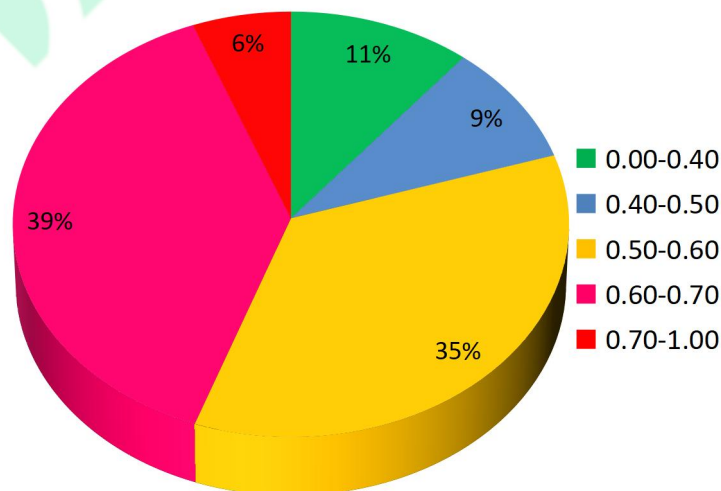


图 3-2-4 京沪高铁轨道板/道岔脱空检测结果分布

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。

3.2.4 III型轨道板揭板验证（赣深铁路、2021.05）

受赣深铁路中铁某局的委托，我公司技术人员对赣深铁路 CRTSIII 型无砟轨道板自密实混凝土脱空情况进行检测，根据提供的信息，本次 CRTS III 型板尺寸主要为：5.600×2.500×0.200m、4.925×2.500×0.200m 及 4.856×2.500×0.200m。本次根据委托方提供的问题库上对应板进行检测。检测结果显示部分轨道板与调整层之间存在缺陷（疏松多孔）。现场检测场景请参图 3-2-5，检测结果请参考图 3-2-6，揭板验证结果请参考图 3-2-7。



图 3-2-5 检测场景

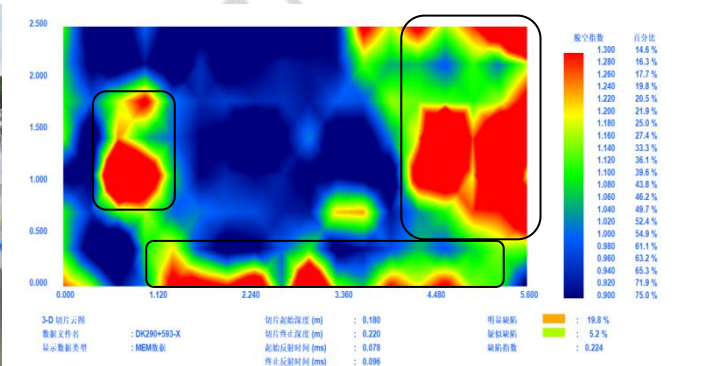


图 3-2-6 CRTS III 型无砟轨道板自密实混凝土检测结果图



图 3-2-7 现场揭板验证图

经过检测及揭板验证表明，

- 1) 无砟轨道板自密实混凝土中的确存在一定程度缺陷；
- 2) 测试缺陷位置与揭板实际缺陷位置基本一致；
- 3) 缺陷类型大多以密集型小气泡为主（疏松多孔）。

3.3 修补效果确认检测

3.3.1 现场应用（郑阜客专，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。

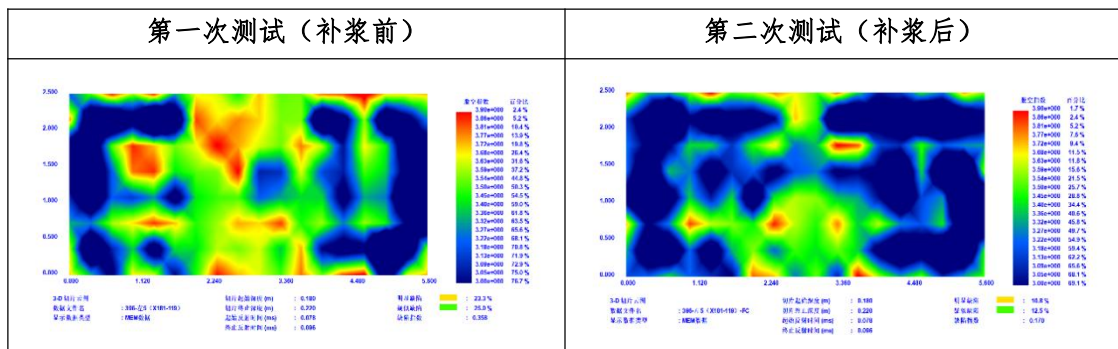
2) 检测结果

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）
--	------------	------------

CRTS III 型板式无砟轨道伤损检测技术体系

表 3-3-3 幅值法解析结果 (描画值: 3~3.9 波速: 4.6)



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。

3.3.2 道岔板脱空修补效果检测 (上海铁路局, 2020.10-12)

1) 概述

受施工单位委托,我公司采用冲击回波法对镇江、常州、无锡、黄渡道岔板脱空,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

CRTS III 型板式无砟轨道伤损检测技术体系

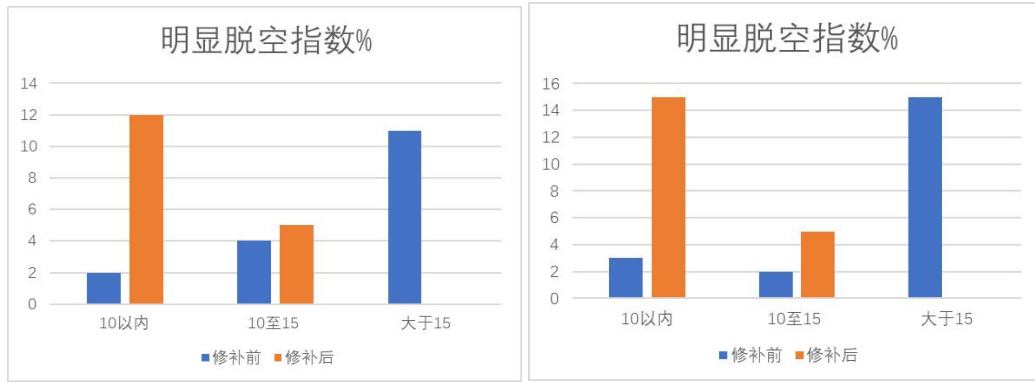


图 3-3-9 修补前后明显脱空比例统计图

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 常州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 4 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。

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

