

铁道混凝土结构 CT 检测技术方案

(V1.10)



2017-08-05 初稿

2020-08-21 第 7 次修订

2021-02-25 第 8 次修订

2023-10-19 第 9 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
1.1 检测意义	3
1.2 检测难点	4
1.3 技术现状	4
1.4 冲击弹性波技术	5
1.4.1 技术简介	5
1.4.2 开发历程	5
第 2 章 铁道混凝土结构 CT 检测	5
2.1 检测对象	5
2.2 检测方法	6
2.3 检测原理	6
2.4 现场验证及应用：铁路桥墩及连接处	6
2.4.1 桥墩与桥梁连接处浇筑缺陷（浙江某铁路大桥 . 2011）	6
2.4.2 陈家畈某桥零号块检测（2015）	7
2.4.3 桥台混凝土内部缺陷（中铁西南科学研究院）	7
2.4.4 零号块内部缺陷检测（福建、2018.07）	8
2.4.5 高铁 0#块检测（曲阜-鲁南铁路、2020.06）	9
2.4.6 高铁 0#块检测（三维 CT，2020.10）	10
2.5 现场验证及应用：其他结构	11
2.5.1 圆形混凝土柱 CT 检测例（四川成都、2016.04）	11
2.5.2 无砟轨道底座板检测（2016）	12
2.5.3 铁路桥梁腹板内部缺陷检测（湖南、2019.07）	12
2.6 特点和影响因素	14
2.6.1 六面体真三维 CT 反演及 720° 全方位显示（模拟数据）	14
2.6.2 真三维 CT 反演及 720° 全方位显示（成都，2020.07，模型梁体）	15
2.6.3 圆柱体真三维 CT 反演及 720° 全方位显示（模拟数据）	16
2.6.4 影响因素	18
第 3 章 BQIM 管理机能	18
结语与致谢	18

第 1 章 概述

自日本于 1964 年修建第一条高速铁路以来，高铁建设事业就在全球范围内得到了迅速发展，整个设计速度也实现了从 200km/h 到 300km/h 的大幅度跨越，近年来我国的高铁建设事业也在迎头赶上，并实现了跨越式的超越，在全世界范围内也处于领先水平。在高速铁路的建设过程中，混凝土的使用量也非常大，要求也非常高，在社会基础设施中占据举足轻重的地位。然而在使用过程中，不可避免地出现各种老化、劣化现象（如铁道混凝土内部缺陷、后浇带损伤、轨道板脱空等）。同时，如果施工质量得不到很好的保证，会加速结构的劣化，从而造成社会经济的损失。

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高铁混凝土结构的浇筑质量、结构的缺陷的综合解决方案和技术体系。该方案基于无损检测技术，具有测试效率高、可靠性好、对结构无损伤等特点，可以大大地提高混凝土材料及结构的质量。

该技术体系的检测内容主要包括铁道混凝土内部缺陷及脱空。

整个技术体系采用冲击弹性波作为测试媒介，并集成到测试设备中（铁道混凝土结构扫描仪，SCE-CT）。其测试精度和效率达到工程要求，已在国内外数百个各类工程中得到了实际应用。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。



铁道混凝土结构扫描仪（SCE-CT）

1.1 检测意义

在铁道基础设施建设工程中，其混凝土质量是非常重要的，直接影响到铁道的耐久性和安全性。然而，连续梁 0#块混凝土因其结构体积大、配筋密集等原因，施工过程中易出现混凝土松散离析、空洞等特有的质量问题。同时对铁道预应力混凝土连续梁桥而言，随着跨度的增大，刚度、挠度要求的提高，造成连续梁 0#截面尺寸增大，预应力钢束和钢筋密集；加之入人洞、预埋件等构造复杂，且支座上方底板常设有数层钢筋网，

使得该处混凝土浇筑难度增大，在 0#块施工过程中，若施工工艺控制不到位，容易发生漏振、漏浆等现象，导致混凝土内部形成蜂窝状不密实或空洞等内部缺陷，给铁路运营安全带来极大隐患。

为了保证铁路桥梁安全服役，必须选取科学的检测方法对此类缺陷进行检测评估。长期以来，基于超声波的测试方法得到了一定的应用，然而，其局限性（如测试范围窄、功能单一等）也日益显著，在测试混凝土缺陷、模量等方面的精度也因理论方面的缺陷而一直得不到提高。为此，自 90 年代以来，基于冲击弹性波（超声波为其一特例）的测试技术得到了飞速的发展，最广为人知的当为 PIT（基桩完整性测试）方法。近年来，将冲击弹性波推广并应用于混凝土结构物的材质（强度、模量）、缺陷（裂缝、剥离、内部空洞、蜂窝等）以及几何尺寸（厚度、埋深等）的无损检测和评价已成为国际热门的研究方向，而且逐步进入工程实际应用。例如，美国材料学会标准 ASTM-C1383-98 就规定了利用弹性波测试混凝土厚度和波速的测试方法。在日本土木学会也基于冲击弹性波波速，对混凝土结构和试样弹性模量以及强度进行了标准化和规范化。

1.2 检测难点

混凝土内部缺陷一般在浇筑完成、脱模后才能够被发现，造成现场检测工作操作较困难。主要存在以下难点：

- 1) 缺陷位于大体积混凝土内部，个别缺陷深度大；
- 2) 缺陷产生部位多布置支座上盖板、防落梁装置等，对缺陷形成遮盖，对检测构成较大干扰；
- 3) 0#块混凝土内部钢筋密集、预埋件较多

1.3 技术现状

因此，无论从保护结构整体性还是现场实际实施角度讲，检测工作都应采用无损检测手段进行。现有的技术手段包括：超声波探测法、地质雷达探测法、冲击弹性波 CT 法。

超声波探测法：优点为成本低、速度快、仪器操作简便；缺点为检测深度优先（一般不超过 2m）、检测结果准确度易受到钢筋影响，只能进行定性分析不能直观准确地展示缺陷。

地质雷达法：优点为成本低、速度快，检测结果可以形成直观图形；缺点为检测结果准确度易受到钢筋影响、检测需采用单侧面法，在检测平面时有遮盖时无法扫描（如有支座盖板遮挡）。

1.4 冲击弹性波技术

1.4.1 技术简介

我们基于冲击弹性波，开发了一套针对铁道混凝土结构的无损检测技术。

表 1-4-1 检测对象及主要参数

结构	项目	方法	备注
连续现浇梁	缺陷	弹性波计算机层析扫描技术 (CT)	
底座板	内部损伤		

该技术均以冲击弹性波为检测媒介，结合现代的信号分析技术和图像处理技术，独自开发了针对性的分析方法，具有测试效率较高、精度和可靠性好的特点。

1.4.2 开发历程

连续梁 0#块混凝土因其结构体积大、配筋密集等原因，施工过程中出现混凝土松散离析、空洞等特有的质量问题。是危害铁道工程安全和耐久性的最重要的因素之一。

我们根据对各种技术的综合分析，基于冲击弹性波技术基础上的 CT 法是最为可能的途径。经过持续研究和开发，建立了一套测试和评价系统。在不断的试验，我们对检测设备、分析方法等均进行了优化和改进，使之基本上达到了可实用的水平。

第 2 章 铁道混凝土结构 CT 检测

我们在冲击弹性波技术基础上，通过对算法、设备的改进，开发了铁道混凝土结构的独创的 CT 检测方法和设备。

2.1 检测对象

表 3-1-1 检测对象及主要参数

构件	参数	
桥梁、桥墩	反演弹性波波速	缺陷、空洞等
钢管混凝土		混凝土动弹模
无砟轨道		混凝土抗压强度

0#块结构示意图

2.2 检测方法

铁道混凝土内部的材质、损伤状况等进行检测时采用弹性波 CT 法测试。弹性波 CT 技术通过弹性波（P 波）对被检断面进行扫描，测试的数据信号经采集、反演、重建得到能真实反映其结构内部情况不失真的弹性波速度分布图像，以达到检知结构物内部缺陷的目的。

其原理是依据“走时成像原理”将速度函数信号作为投影数据，在有网格计算的数学模型下，利用同时迭代重建技术（Simultaneous Iterative Reconstruction Technique: SIRT）和约束最小二乘类算法（Iterative Least Square Technique: ILST）等反演算法求解方程求出检测断面上弹性波速度的分布，即实现 CT 断层扫描成像，通过断面上弹性波（P 波）速度的分布来评价混凝土的质量和判断混凝土内部可能存在的缺陷。若测试区域内有缺陷，则弹性波的传播时间会增长，通过测线的距离反演的速度会降低。不经过缺陷测线的速度几乎不变。测线越多，CT 解析精度和分辨率越高。

2.3 检测原理

计算机层析扫描（Computer Tomography，简称 CT）是上世纪 70 年代发展起来的，针对医疗领域的一种非常有效的检测手段。起初是利用 X 射线，后来发展利用超声波、弹性波等各种具有直进特性的媒质，其应用领域也从单纯的医疗领域拓展到工业、土木检测等行业。

详细原理、验证等请参见“SCIT-1-TEC-00-冲击弹性波检测技术基本原理”。

2.4 现场验证及应用：铁路桥墩及连接处

2.4.1 桥墩与桥梁连接处浇筑缺陷（浙江某铁路大桥 .2011）

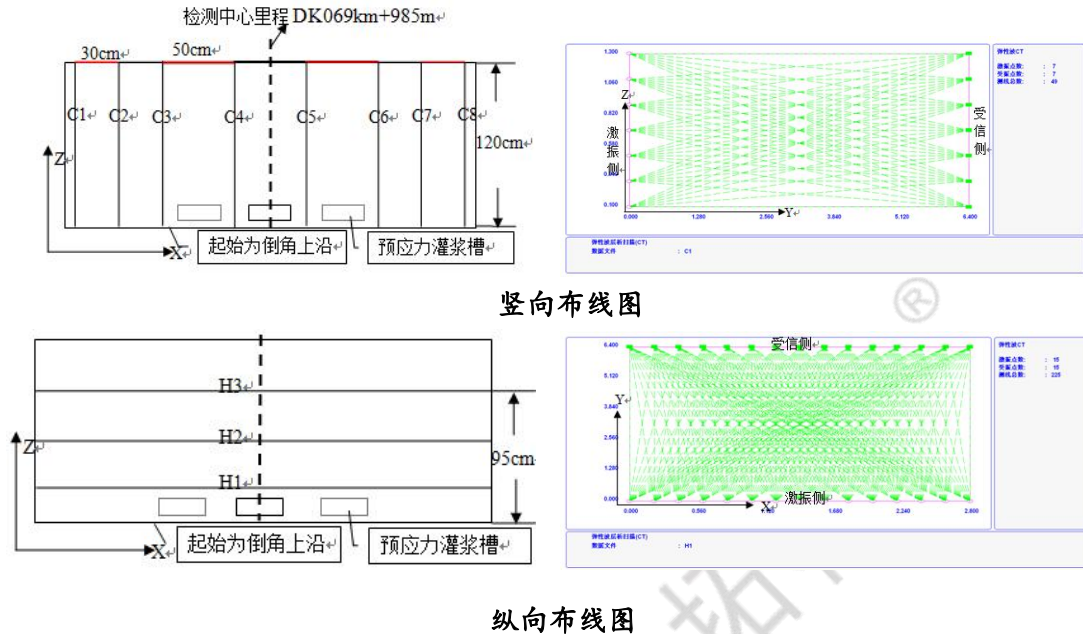
受中铁某局委托，用弹性波 CT 测试了铁路桥桥墩与桥梁连接处混凝土的浇筑质量和缺陷。



工程全景及检测情景

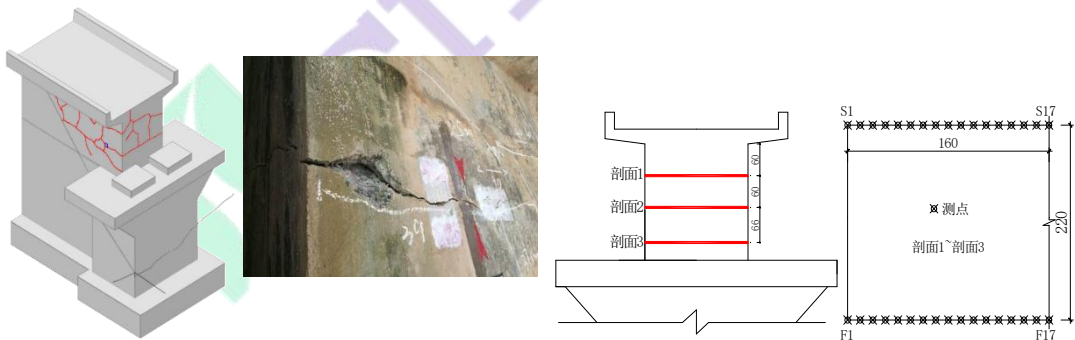
2.4.2 陈家畈某桥零号块检测（2015）

2015 年 11 月 21 日，受中铁某局集团对陈家畈某桥零号段进行混凝土缺陷检测，此次测试采用竖向和纵向布点，布点示意图如图。



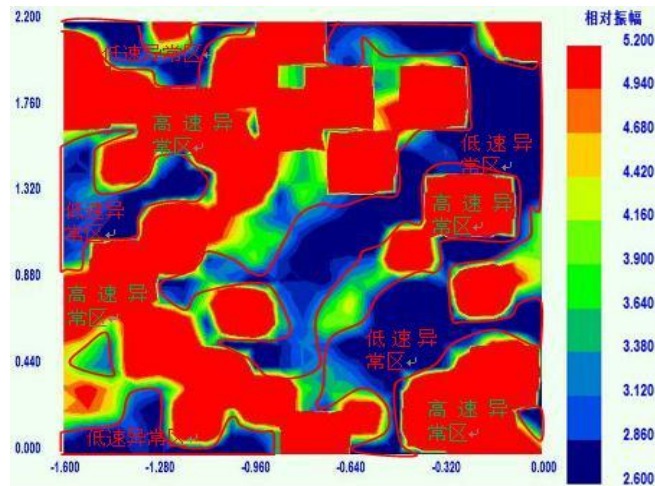
2.4.3 桥台混凝土内部缺陷（中铁西南科学研究院）

中铁西南科学研究院王谦等人^[8]对某伤损桥台的内部裂缝的发展情况及内部混凝土的质量，对桥台进行了弹性波层析扫描(CT)。



桥台表面裂缝分布图、CT 剖面布置图

现场选取桥台表面裂缝较为严重的 3 个剖面进行 CT 检测。检测剖面为一个 1.6m(纵向)×2.2m(横桥向)的矩形平面，在每个剖面的 2 个对立面均布置 17 个测点和激发点，单个剖面均布置 289 条测线。



CT 剖面-1 测试波速等值线图

结果表明，该测试区域的弹性波速离散较大。即存在大量低于 3700m/s 声速的低速异常区域（推测为裂缝或不密实等缺陷），也存在大量高于 4200m/s 声速的规则高速异常区域（推测为可疑异物）。由于桥台病害严重，已对桥梁运营安全构成威胁，故后期对桥台进行了拆除重建。在桥台拆除过程中发现，各剖面中的低速异常区域均存在裂缝或混凝土不密实现象，高速异常区域均存在石块等。经过对剖面 1、剖面 2 和剖面 3 中的混凝土缺陷面积进行了测量，测量发现实测面积与 CT 检测结论基本一致。

2.4.4 零号块内部缺陷检测（福建、2018.07）

受福州铁建工程质量检测有限公司的邀请，我公司技术人员携带专用设备对福建省某大桥进行零号块内部缺陷检测。该桥墩身采用圆端型实体桥墩共计 11 个，墩高 10~21.5m。桥台采用 T 型实体桥台。0 号台位于某隧道棚洞内，1 号墩、2 号墩承台基础采用双壁钢围堰施工，零号块混凝土设计强度为 C55。



现场检测图

其中：1 号墩零号块 1#剖面（0.1m）测试结果如下：

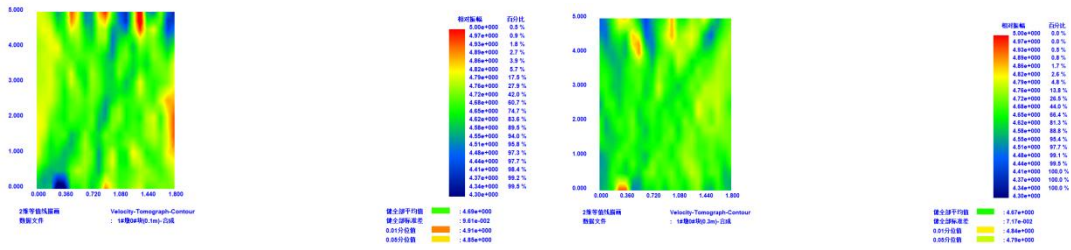


图 2-4-15 1#剖面 (0.1m)CT 检测云图

2 号墩零号块 1#剖面 (0.1m)测试结果如下:

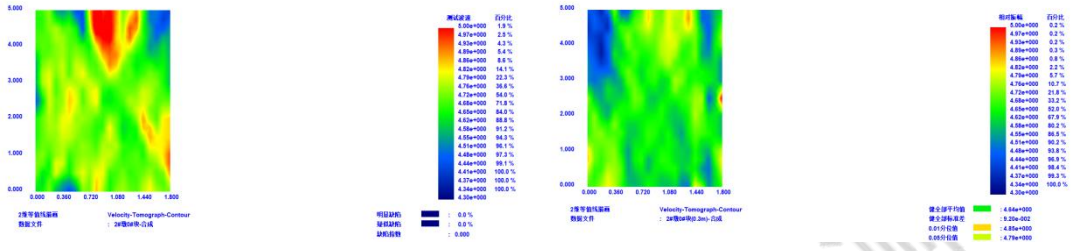


图 2-4-16 2#剖面 (0.1m)CT 检测云图

通过对该大桥 1#、2#桥墩零号块断面 CT 检测, 结果如下:

- (1) 零号块整体混凝土质量相对较好, 未发现明显的混凝土缺陷。
- (2) 零号块不同高程断面存在差异, 下部混凝土强度比上部混凝土高。

2.4.5 高铁 0#块检测 (曲阜-鲁南铁路、2020.06)

受青岛理正建设科技有限公司邀请, 我公司对新建鲁南高速铁路菏泽至曲阜段中铁某局集团承建的某特大桥某墩 mT 构梁的零号块进行了检测和验证。

检测后, 采用尖锤对部分检测缺陷区域进行了凿出验证。表明检测结果和破检的表层缺陷位置基本一致, 得到了施工单位的认可。



部分现场破检图

2.4.6 高铁 0#块检测（三维 CT，2020.10）

受中铁某局检测公司邀请，利用我公司自主研发的多通道混凝土质量扫描仪，对某大桥 119#墩 0#块支座上方区域的混凝土内部密实度进行了 3 维 CT 扫描成像检测。



现场测试及测线分布

检测时，激振端设置 48 个激振点和接收点（4 行 12 列），以第一个激振点作为坐标原点。检测区域长 2.75 米，高 0.9 米，厚 8.8 米。检测效果良好，结果直观。

表 2-4-4 检测结果一览表

序号	检测结果图	说明
正视图		左下角绿色区域为：敲击端第一个敲击点（位于实际结构中敲击端的右下角）附近存在局部的轻微不密实现象。
后视图		未发现明显缺陷
剖视图		图中左下角绿色区域为：敲击端第一个敲击点（位于实际结构中敲击端的右下角）附近存在局部的轻微不密实现象。

【注】敲击端是远离爬梯的一端，第一个敲击点位于右下角（距离底面 0.2 米，距右边 0.2

米)。图中的左下角对应现场的右下角，也就是第一个敲击点。

2.5 现场验证及应用：其他结构

2.5.1 圆形混凝土柱 CT 检测例（四川成都、2016.04）

我们对成都某处混凝土柱的内部状况进行了 CT 检测。柱子半径约 0.637m，测试及激振点数 10 个，50 条测线。

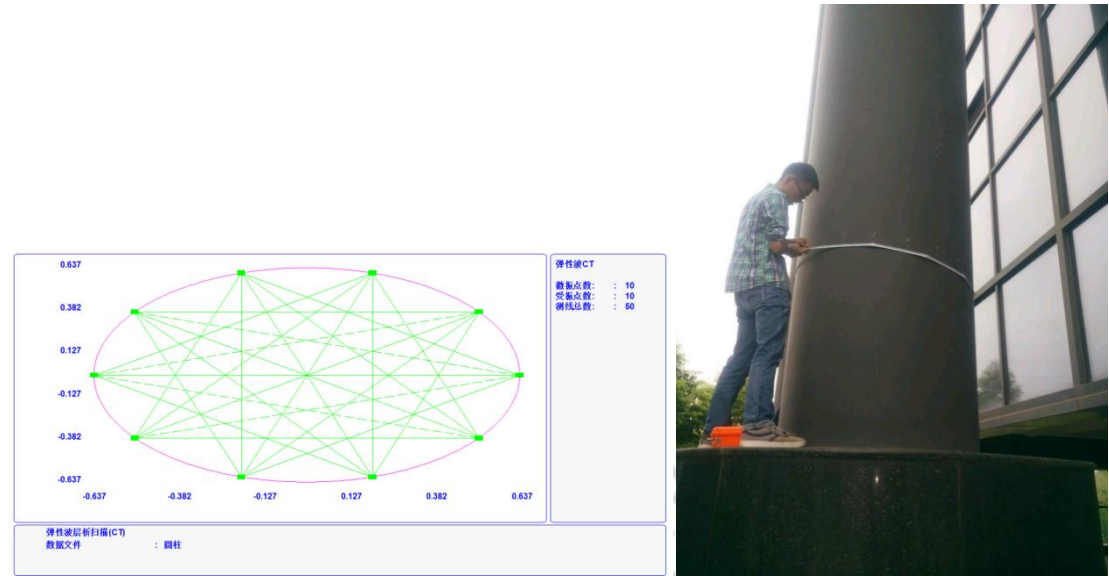


图 2-5-1 测线

照片 2-5-1 现场测点布置

CT 测试结果表明：

- (1) 混凝土波速普遍较低，推算混凝土强度在 C30 左右；
- (2) 中央部分混凝土较为密实、而边缘有部分混凝土较为疏松；
- (3) 中央部分的波速分布呈花型，推测与 CT 测线较少以及网格的剖分有关，还需要进一步优化；

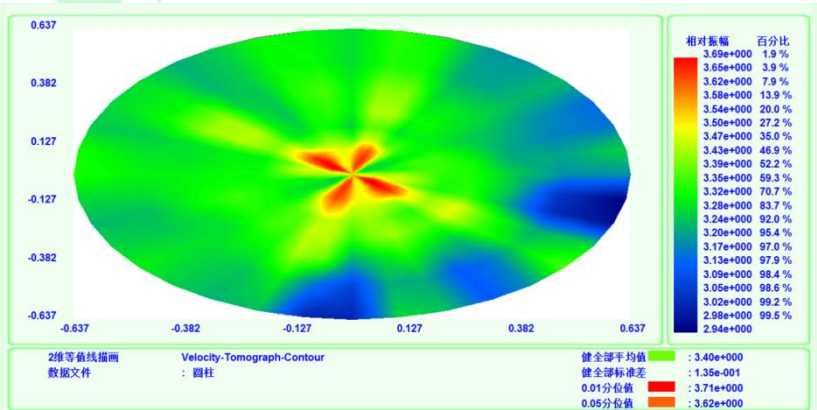


图 2-5-2 CT 分析结果

2.5.2 无砟轨道底座板检测（2016）

受某单位委托，于 2017 年 7 月对某无砟轨道底座板质量进行了测试及检测。检测内容包括底座板内部的材质及损伤状况，同时也对其后浇带进行损伤及质量检测。



现场检测

根据检测结果，有：

- （1） 粉化部分的混凝土弹性模量降低较多；
- （2） 部分底座板内部混凝土也有明显的强度、弹性模量降低的现象；
- （3） 越靠近外缘，混凝土伤损的程度越严重；
- （4） 底座板外观与内部混凝土强度降低有较高的相关关系。在大多数情况下，当外观有粉化现象时，内部混凝土也有不同程度的损伤。也存在个别底座板，外观两侧粉化，但内部仍然较好的现象。

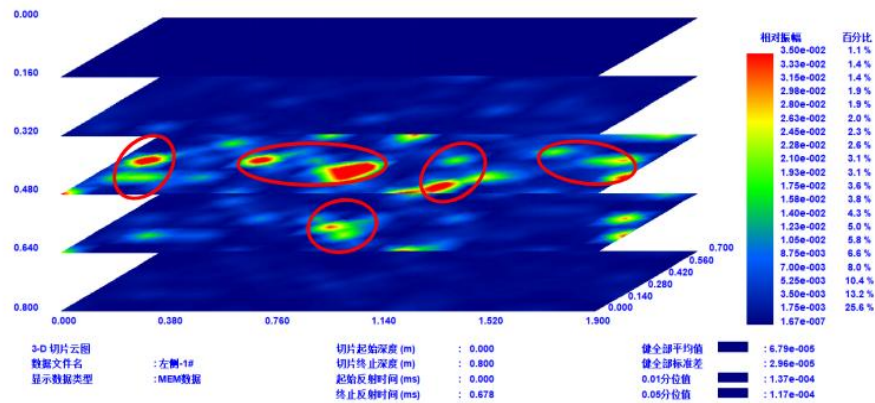
2.5.3 铁路桥梁腹板内部缺陷检测（湖南、2019.07）

受湖南相关单位的委托，我们于 2019 年 7 月对某大桥 2#墩 2 号块腹板左右两侧区域采用冲击弹性波雷达（EWR）对混凝土内部缺陷进行了检测。根据检测结果，施工单位对该区域混凝土进行了修补处理后，我方于 2019 年 8 再次对修补后混凝土内部质量进行复检。



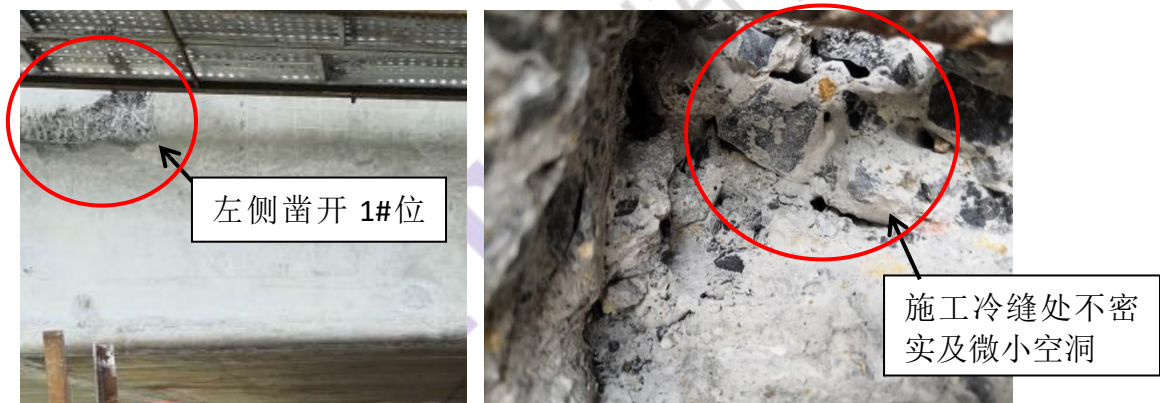
某高速大桥及左侧腹板现场检测图

采用弹性波雷达法（EWR）对张吉怀铁路四方冲跨杭瑞高速大桥 2#墩 2 号块的内部混凝土质量进行检测，其左侧腹板施工冷缝附近混凝土三维切片结果如下图所示。



2#墩 2 号块的左侧腹板施工冷缝区域测试结果等值线图

通过上图结果显示，左侧腹板施工冷缝附近混凝土在深 0.2-0.6m 范围区域，内部混凝土仍存在一定区域的不密实及疑似空洞缺陷，具体缺陷位置见上图红圈区域。根据检测结果对左侧腹板对应位置混凝土凿开，通过观察发现外侧凿开区域存在部分不密实及微小空洞，如下图所示：



左侧腹板外侧位置外观图及缺陷

对此，施工方根据业主要求精心的实施修补，并于 1 个月后邀请我们再次对左侧腹板进行复检，由于左侧腹板测试区域过长，故分为两个区域进行检测，分别为左侧-1#、左侧-2#，测试区域大小均为 1.5m*0.7m（具体位置如下图 1-4）。

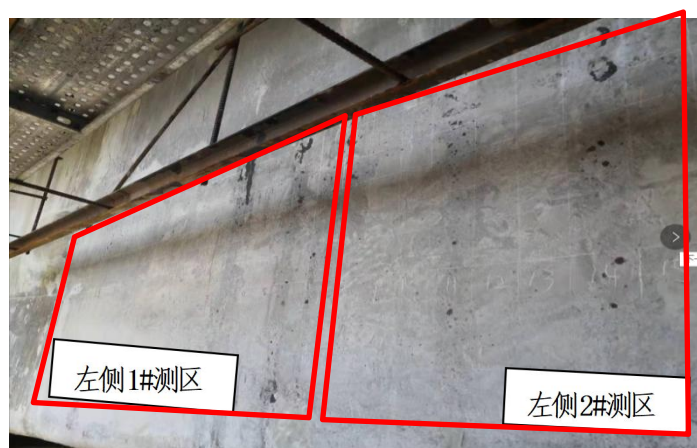


图 2-5-5 左侧腹板现场复检区域布置图

现场复测结果显示 2#墩 2 号块左侧腹板混凝土内部缺陷经修补后，无明显缺陷，修补效果较好，检测结果图如下：

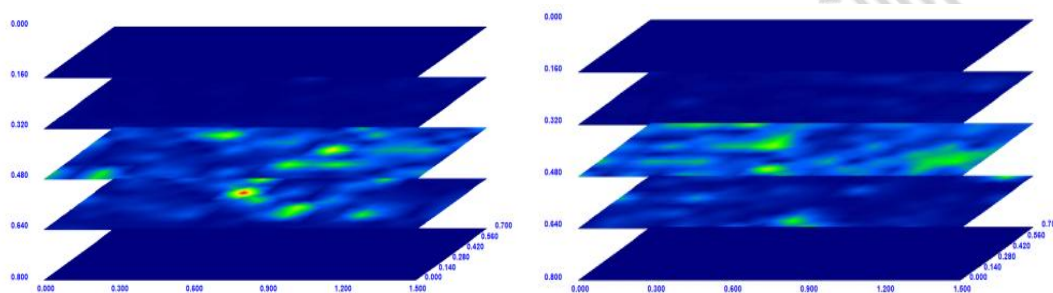


图 2-5-6 左侧腹板复检结果等值线图（左：1#测区 右：2#测区）

采用冲击弹性波雷达法检测结果表明：

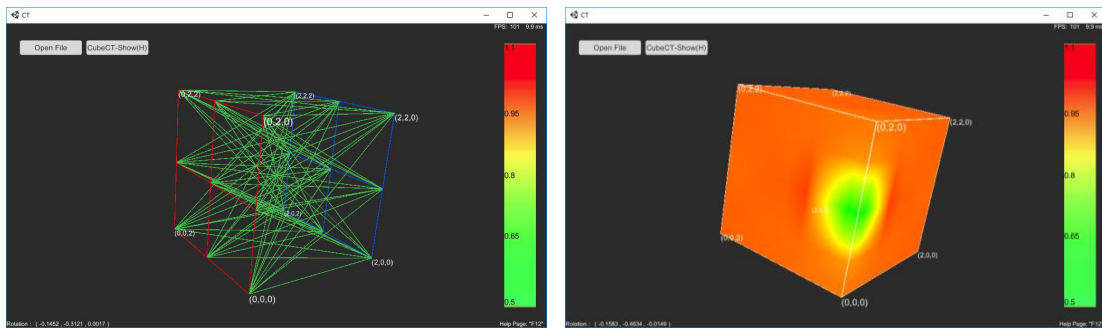
- （1）能够有效检测发现混凝土中的内部缺陷，及时发现问题，指导修补；
- （2）通过本次检测，也证明该修补方案具有一定效果。

2.6 特点和影响因素

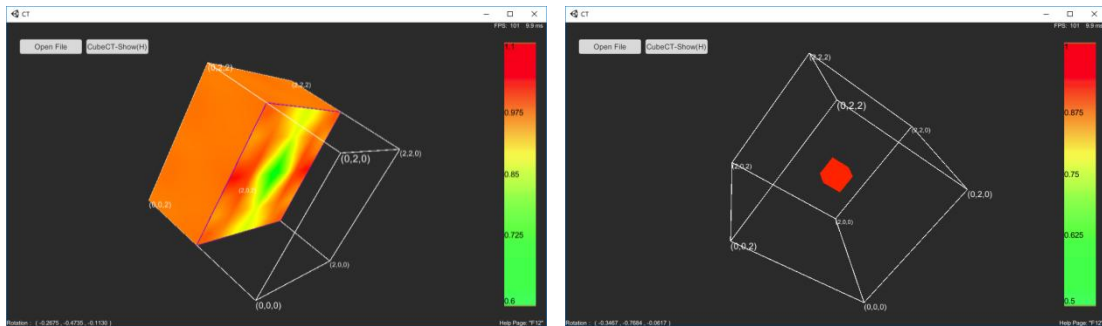
在本设备中所采用的检测方法主要为 CT，适用于铁道混凝土结构的内部缺陷及脱空指数检测，同时也对铁道，客专，桥梁等混凝土的结构质量做系统检测。

2.6.1 六面体真三维 CT 反演及 720° 全方位显示（模拟数据）

本设备不仅支持各断层扫描，而且支持真三维 CT 反演及成像，从而更加准确、直观地反映结构的内部情形。



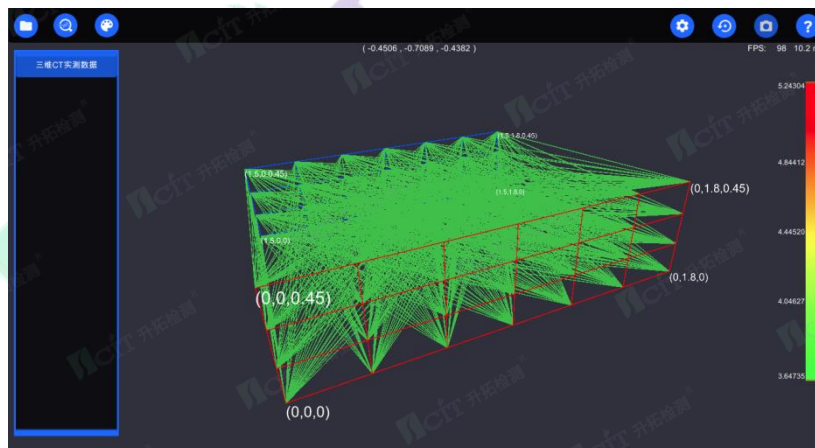
三维 CT 测线及反演结果（边上有缺陷）



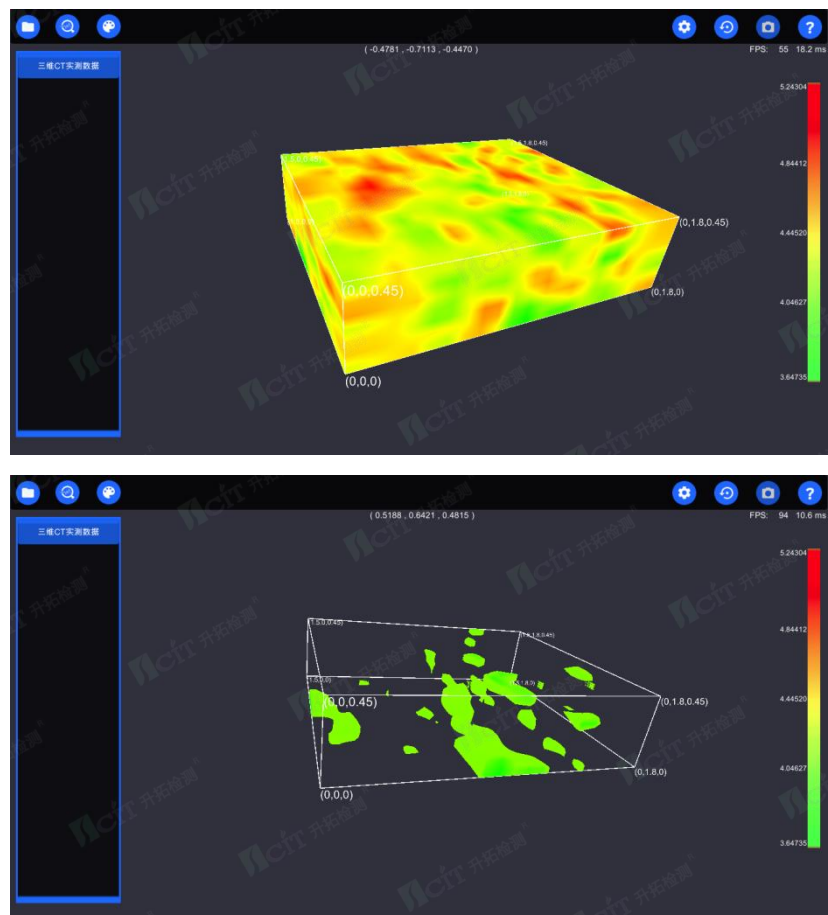
三维 CT 反演结果（中间有缺陷，切片显示及缺陷显示）

2.6.2 真三维 CT 反演及 720° 全方位显示（成都，2020.07，模型梁体）

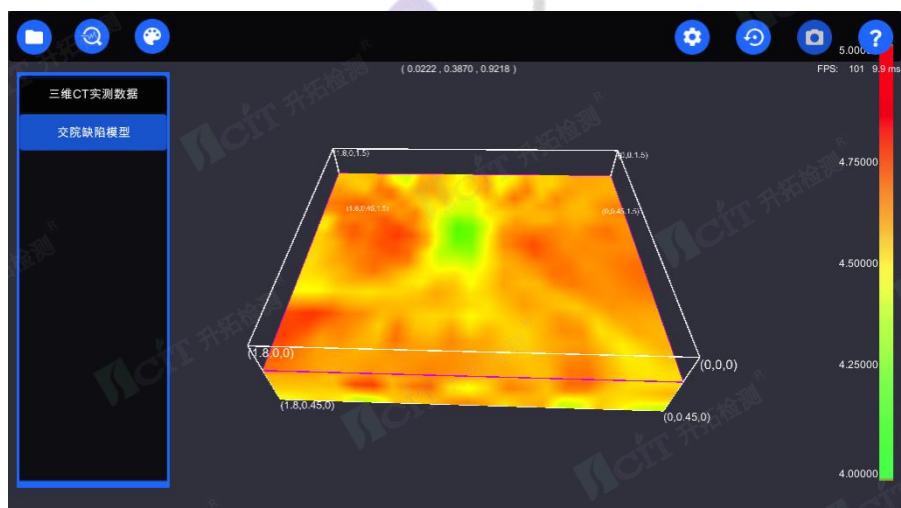
针对某模型梁体，采用真三维 CT 进行了反演分析和成像。



三维 CT 测线（共计 784 条）



反演结果



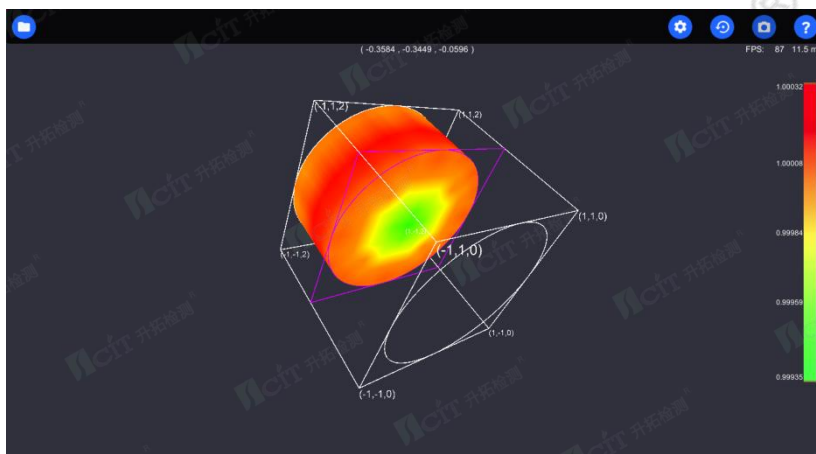
预设缺陷及反演结果（中间绿色区域）对比

2.6.3 圆柱体真三维 CT 反演及 720° 全方位显示（模拟数据）

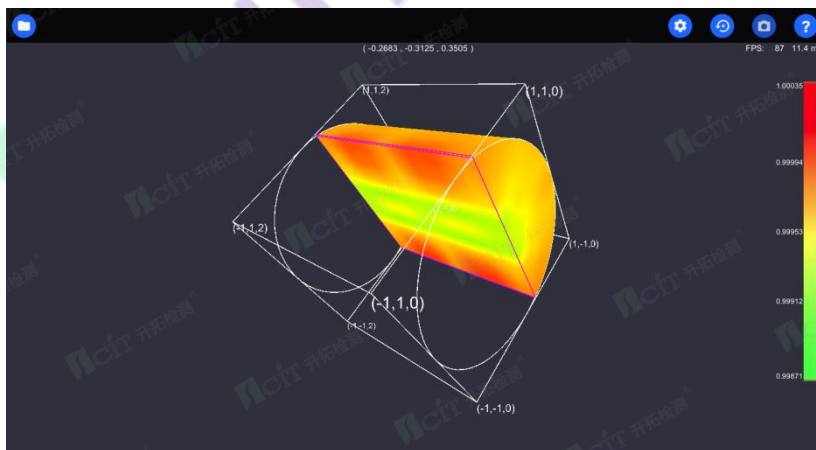
针对圆柱体，我们开发的真三维 CT 技术可以更全面地反映结构内部的状况。



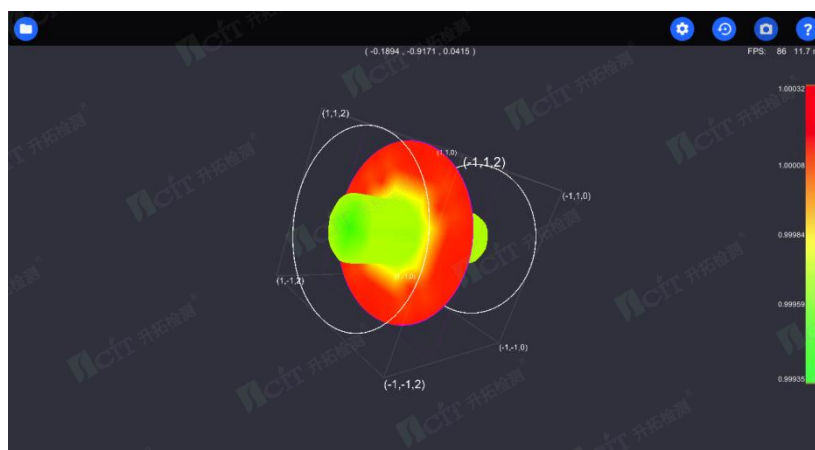
圆柱体 CT 反演测线



圆柱体 CT 反演结果(沿轴向切片)



圆柱体 CT 反演结果(沿径向切片)



圆柱体 CT 反演结果 (沿径向切片+缺陷凸显)

2.6.4 影响因素

- 1) 激振方向与接收方向夹角过大时，测试得到的弹性波 P 波波速有减小的倾向。因此测试布点应遵循夹角最好不超过 45° ，进行分段测试。

第 3 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铁道混凝土结构扫描仪 (SCE-CT) 可以对铁道混凝土结构内部缺陷等进行综合无损检测。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，如冲击弹性波等方法，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。

同时，在设备中我们集成了弹性波层析扫描技术 (CT) 和快速成像、虚拟多频道技术等，大大提高了测试精度和分辨力。

在此，我们衷心期望这些技术、方法和设备能够为我国的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宝贵资料及关心、支持我们的各位朋友表示诚挚的谢意！

技术支持

- ✓ 本资料为非公开资料，需取得本公司同意后方可查阅。未经本公司许可，禁止单位和个人转载，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

✕ TEL: (028)6861-1508、6861-1518

✕ 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