

# 双块式无砟轨道轨枕与道床板界面脱空损伤识别\*

许雪山<sup>1,2</sup>, 杜威<sup>1,2</sup>, 任娟娟<sup>1,2</sup>, 杜俊宏<sup>1,2</sup>, 罗磊<sup>1,2</sup>

(1. 西南交通大学高速铁路线路工程教育部重点实验室 成都, 610031)

(2. 西南交通大学土木工程学院 成都, 610031)

**摘要** 为准确识别双块式无砟轨道轨枕与道床板连接面脱空损伤,建立了双块式无砟轨道冲击回波有限元模型,分析界面损伤对弹性波传播规律的影响。在室内浇筑含有不同损伤位置和不同损伤程度的混凝土复合试件,采用冲击回波法进行损伤识别。研究表明:脱空损伤会显著影响弹性波在界面处的传播,基于回波信号分析可识别损伤;弹性波频率主要受激振锤大小的影响,应结合结构易损位置和理论计算选取合适的激振锤;混凝土复合试件的试验厚度值与理论厚度值相差仅为1 cm,测试结果合理,可用于判断脱空损伤程度,但不能确定损伤区域;利用平面成像技术可准确识别轨枕与道床板界面脱空范围,为双块式无砟轨道结构养护维修提供一定参考,试验结果验证了冲击回波法用于双块式轨道层间脱空识别的可行性和合理性。

**关键词** 双块式无砟轨道;脱空识别;冲击回波法;模型试验;平面成像

**中图分类号** U213;TH6

## 引言

双块式无砟轨道因其造价低、结构型式统一等优点得到广泛应用;然而,双块式轨枕与道床板连接面属于新旧混凝土交界面,施工操作不当易使界面产生初始的微小裂纹,在列车动荷载、温度及雨水等耦合作用下,裂纹逐渐发展为脱空损伤,直接影响行车平稳性和安全性<sup>[1]</sup>。因此,对双块式无砟轨道轨枕与道床板界面损伤进行识别研究,及时掌握层间损伤情况,对制定科学合理的轨道结构养护维修策略具有重要意义。

目前,主要采用探地雷达法和冲击回波法对无砟轨道结构常见的层间离缝(或脱空)和内部空洞等损伤进行分析。针对探地雷达法,学者们利用室内、现场试验及正演数值模拟对板式无砟轨道砂浆层缺失、空洞病害等进行识别<sup>[2-4]</sup>,但损伤识别精度较难保证。针对冲击回波法,目前基于结构振动响应的传统冲击回波法包含单点式和扫描式,已在无砟轨道轨道板蜂窝伤损和裂缝深度<sup>[5]</sup>、填充层离缝/脱空<sup>[6]</sup>等损伤识别中得到广泛应用。扫描式冲击回波仪受滚轮式传感器采集信号精度的限制,其识别准确率低于单点式,主要用于大尺寸结构的损伤普查<sup>[7]</sup>。部分学者提出了基于声音信号的空气耦合冲

击回波法。该方法不受测点表面平整度影响,但易受外界环境噪声的干扰,主要应用于隧道衬砌质量检测<sup>[8]</sup>和单层混凝土板脱空识别<sup>[9]</sup>,针对无砟轨道这类多层结构体系的损伤识别应用较少。

可以看出,现有研究大多是针对板式无砟轨道砂浆层或自密实混凝土层损伤开展识别研究,对双块式无砟轨道轨枕与道床板界面损伤关注较少。考虑到传统冲击回波法对板式轨道层间损伤的识别效果较好,且空气耦合冲击回波法在无砟轨道隐蔽损伤识别中的应用还不成熟。因此,笔者选择传统冲击回波法识别双块式无砟轨道轨枕与道床板的界面脱空损伤,在数值分析轨道内部冲击弹性波传播规律的基础上,通过室内浇筑含界面脱空的轨枕与道床板复合试件,采用冲击回波法对界面不同损伤位置和损伤程度进行识别研究。

## 1 冲击回波数值模拟

如图1所示,利用ABAQUS有限元软件建立了含界面脱空的双块式无砟轨道有限元模型。模型中轨枕与道床板、道床板与支承层均采用绑定接触。为避免在有限元边界处反射波对求解结果的影响,在无砟轨道纵向两端位置的道床板和支承层设置无

\* 国家重点研发计划资助项目(2021YFF0502100);国家自然科学基金资助项目(52278461,52308467);高速铁路无砟轨道设计与维护四川省青年科技创新研究团队资助项目(2022JDTD0015)

收稿日期:2022-06-21;修回日期:2022-09-27

限元,采用CIN3D8无限单元模拟,其余轨枕、道床板和支承层均采用C3D8R实体单元进行模拟,材料为简化后的各向同性均匀混凝土。由于在实际工程中双块式无砟轨道轨枕与道床板界面损伤形式较为复杂,笔者重点对比界面有无损伤对冲击弹性波在结构内部传播规律的影响,不关注不同脱空尺寸大小的影响。借鉴文献[10]中有关轨枕脱空尺寸的仿真设计,在轨枕底部设置 $100\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的贯通脱空损伤,冲击荷载采用正弦半波,在中间轨枕顶面中心单元处施加,荷载峰值为 $1\text{ kN}$ ,冲击持续时间为 $32\text{ }\mu\text{s}$ ,数值积分方式为动力显示分析。双块式无砟轨道模型参数如表1所示。

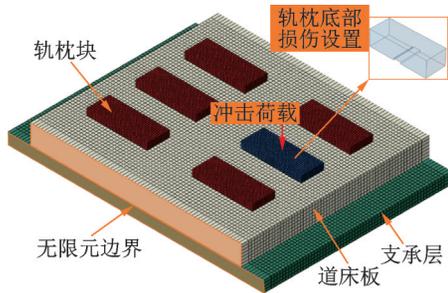


图1 含界面脱空的双块式无砟轨道有限元模型

Fig.1 Finite element model of twin-block slab track with interface contact loss

表1 双块式无砟轨道模型参数

Tab.1 Model parameters of twin block slab track

参数	轨枕	道床板	支承层
长度/mm	800	2 150	2 150
宽度/mm	300	2 800	3 400
厚度/mm	200	260	150
弹性模量/ $10^{10}\text{ Pa}$	3.65	3.25	2.25
密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 500	2 500	2 500
泊松比	0.2	0.2	0.2

计算得到不同时间节点下轨枕与道床板在垂向方向的应力云图。图2为无界面损伤的无砟轨道应力云图,图3为含界面损伤的无砟轨道应力云图。由于冲击荷载仅施加在单块轨枕表面,故只对含激励荷载的半块无砟道床进行分析。

由图2可知,当轨枕与道床板界面无损伤时,弹性波在 $80\text{ }\mu\text{s}$ 到达界面处,由于轨枕与道床板的密度、弹性模量等材料性质相差较小,因此绝大部分弹性波发生折射,继续向道床板内传播。由图3可知,当轨枕与道床板界面存在脱空损伤时,弹性波在达到界面后,由于轨枕与缺陷处空气的声阻抗相差较大,大部分弹性波发生反射,部分弹性波在脱空边缘

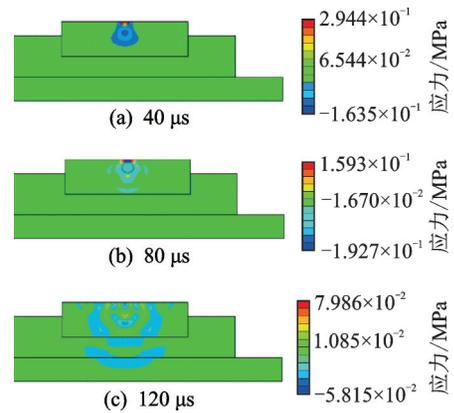


图2 无界面损伤的无砟轨道应力云图

Fig.2 Stress cloud map of slab track without interface damage

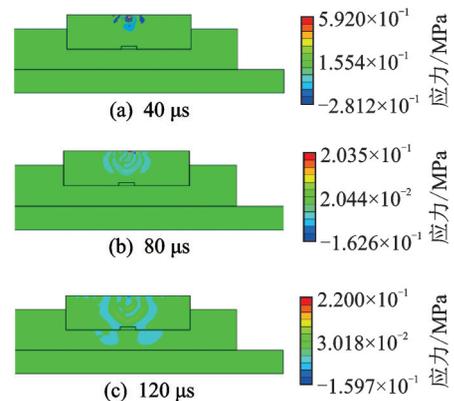


图3 含界面损伤的无砟轨道应力云图

Fig.3 Stress cloud map of slab track with interface damage

位置发生衍射后继续向下传播。对比图2,3可知,当双块式轨枕与道床板出现损伤后,冲击弹性波在结构内部的传播规律显著不同,可利用信号处理技术对回波数据进行分析,实现界面损伤识别。

## 2 试件制作及抗压强度测试

为验证理论结果的正确性,浇筑混凝土复合试件来模拟双块式无砟轨道中轨枕块与道床板结构。

双块式无砟轨道实际结构尺寸较大,其中SK-2型轨枕长宽高分别为 $844, 314$ 和 $220\text{ mm}$ ,埋入道床板 $130\text{ mm}$ 。从试验的可操作性和便捷性角度出发,将轨枕尺寸缩小一半。考虑到界面损伤位置和损伤大小是影响弹性波在结构内部传播的主要因素,参照文献[11-12]浇筑混凝土复合试件,道床板和轨枕尺寸均为 $400\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ ,分别按照C40和C60混凝土浇筑,材料配合比<sup>[12]</sup>如表2所示。

浇筑下部的道床部分,提前在轨枕与道床板界面放入钢板,以此模拟界面损伤。钢板厚度为

表2 材料配合比

混凝土等级	C40	C60
水泥	300	400
粉煤灰	70	30
矿粉	45	—
砂	758	676
碎石	1 026	1 255
水	158	124
减水剂	—	4

0.8 cm,长为20 cm,宽度分别为5,10,15及20 cm。损伤工况设置如表3所示,每种工况浇筑1个复合试件,共9个试件。在标准养护室养护7 d后,浇筑上层的轨枕部分。为了更真实地考虑轨枕中钢筋对界面损伤检测的影响,在浇筑轨枕之前预埋2根直径为6 mm的带肋钢筋。待满28 d龄期后进行脱模,抽出钢板,形成含界面损伤的轨枕与道床板复合试件。图4为轨枕与道床复合试件示意图。

表3 损伤工况设置

试件编号	损伤位置	损伤宽度/cm
1	无损伤	0
2	中部	5
3		10
4		15
5		20
6		5
7	端部	10
8		15
9		20

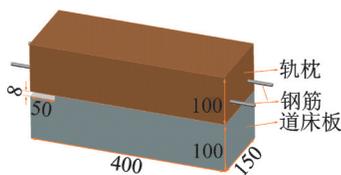


图4 轨枕与道床复合试件示意图(单位:mm)

Fig.4 Schematic diagram of composite specimen of sleeper and track slab(unit:mm)

为确定浇筑的混凝土试件是否达到无砟轨道施工技术规范,在浇筑复合试件的同时,针对C40和C60 2种等级的混凝土分别浇筑3个边长为100 mm的立方体试件,按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002),采用TYE-2000E型压

力试验机对其进行抗压强度测试。结果表明,道床板试件和轨枕试件的平均抗压强度分别为40.6 MPa和62.2 MPa,均满足强度要求。

### 3 冲击回波测试

#### 3.1 检测原理

由于本次试验对象为混凝土复合试件,尺寸较小,故笔者采用某公司研发的高铁轨道基础综合质量检测仪LT-RHMDT进行测试。该设备属于单点式回波仪,主要由加速度传感器、激振锤及分析系统等组成,具有受人为影响因素小、操作简单和可靠性高等优点。

当冲击弹性波从轨枕向道床板垂直传播时,由于不同材料的声阻抗存在差异,弹性波在轨枕与道床板的界面发生反射和折射,其程度主要与反射系数有关。

材料的声阻抗计算公式为

$$Z = \rho v \quad (1)$$

其中: $\rho$ 为介质的材料密度; $v$ 为弹性波波速。

将式(1)代入式(2),得到界面的反射系数为

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (2)$$

其中: $Z_1, Z_2$ 分别为轨枕和道床板的声阻抗。

采用用于抗压强度测试的3个C60和3个C40立方体混凝土试件获取混凝土的表观密度,采用LT-10激振锤分别标定弹性波在轨枕和道床中的传播速度,每个试件测试3次并计算其平均值,最终将3个试件对应的波速求均值。得到C60和C40混凝土对应的弹性波波速分别为3 799 m/s和3 647 m/s,声阻抗分别为 $9.24 \times 10^6$  kg/m<sup>2</sup>/s和 $8.72 \times 10^6$  kg/m<sup>2</sup>/s。根据式(2)可得轨枕与道床板界面的反射系数仅为-0.03,表明当两者界面无损伤时,绝大部分的弹性波会折射入道床板中。考虑到空气具有更低的声阻抗,其值为 $0.004 \times 10^6$  kg/m<sup>2</sup>/s,当轨枕与道床板界面存在离缝或脱空损伤,轨枕与空气界面的弹性波反射系数为0.999,表明绝大部分弹性波会发生反射。

冲击回波法的检测原理是利用小钢球等激励装置瞬时冲击结构表面,产生的弹性波在向下传播时遇到缺陷发生反射,当反射波到达表面时引起结构振动,在激振点附近利用传感器接收能够表征结构微小变形的位移、加速度等信号,通过对检测信号的频谱分析可判断测点损伤情况。考虑到冲击回波法

激发的弹性波属于高频振动,在高频范围内结构振动强度与加速度大小成正比,故大多利用采集的测点振动加速度进行频谱分析。冲击回波法检测原理如图5所示。

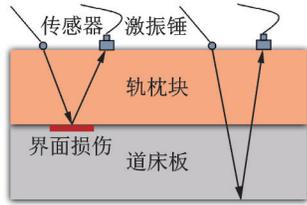


图5 冲击回波法检测原理

Fig.5 Detection principle of impact echo method

### 3.2 激振锤选取及波速标定

LT-RHMDT设备含有3种激振锤,分别为LT-10,LT-17和LT-30,对应的钢球直径分别为10,17和30 mm。不同大小的激振锤激发的弹性波频率不同,为了产生合适频率的激振弹性波,需要选择大小合适的激振锤。影响激振弹性波频率的主要因素为激振锤与混凝土试件表面接触时间,其与引起的弹性波自振频率的关系<sup>[13]</sup>为

$$f_s = 1.25/T_c \quad (3)$$

其中: $T_c$ 为激振锤与混凝土的接触时间; $f_s$ 为弹性波自振频率。

$T_c$ 主要由激振锤的质量、前端的曲率半径及接触时的冲击速度等决定。对于圆钢球, $T_c$ 的计算公式<sup>[14]</sup>为

$$\left\{ \begin{array}{l} T_c = 4.53 \left[ \frac{(\delta_1 + \delta_2)m_1}{\sqrt{R_1 v_0}} \right]^{2/5} \\ \delta_1 = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1 \pi} \\ \delta_2 = \frac{1 - \mu_2^2}{E_2 \pi} \\ m_1 = \frac{4}{3} \pi R_1^3 \rho \end{array} \right. \quad (4)$$

其中: $E_1$ 为钢球的弹性模量,取 $2.1 \times 10^{11}$  Pa; $E_2$ 为混凝土轨枕的弹性模量,取 $3.6 \times 10^{10}$  Pa; $\mu_1$ 为钢球的泊松比,取0.3; $\mu_2$ 为混凝土轨枕的泊松比,取0.2; $R_1$ 为钢球的半径; $v_0$ 为钢球与混凝土接触时的碰撞速度,由钢球自由下落0.6 m计算; $m_1$ 为钢球的质量; $\rho$ 为钢球密度,取 $7800$  kg/m<sup>3</sup>。

针对未含脱空损伤的轨枕与道床板复合试件,在轨枕上表面长度方向的中轴线上等间距布置3个测点,采用LT-10激振锤获取测点加速度响应,采样

频率为1 MHz,采样时间为10 ms。考虑到最大熵法(maximum entropy method,简称MEM)较快速傅里叶变换的频谱分辨率更高,笔者采用MEM对测点响应进行频谱分析。图6为测点响应的频谱分析图。

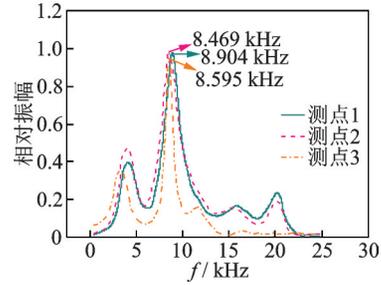


图6 测点响应的频谱分析

Fig.6 Spectral analysis of response at measurement points

在冲击回波法测试中,由瞬时冲击产生的弹性波从结构顶面传播到底面,经反射后再返回到顶面,波的传播行程为2倍板厚( $2H$ ),传播速度为 $v$ ,则对应的传播时间 $\Delta t = 2H/v$ ,由于在激振点附近采集的加速度信号中必然包含一个周期为 $\Delta t$ 的卓越振动,频率 $f = 1/\Delta t = v/2H$ ,考虑结构截面系数 $\beta$ 的影响,得到振动信号频谱图中的峰值频率为

$$f = \frac{\beta v}{2H} \quad (5)$$

其中: $v$ 为弹性波波速; $H$ 为复合试件厚度,为0.2 m; $\beta$ 为试件横截面形状系数,取0.96。

由图6可知, $f$ 的均值为8.656 kHz,弹性波波速为3607 m/s。

结合式(3)~(5)计算得到LT-10,LT-17和LT-30不同激振锤激发的弹性波波长分别为10.46,17.79和31.39 mm。考虑到轨枕与道床板界面脱空损伤距离轨枕上表面10 cm,当弹性波波长超过缺陷深度时,弹性波容易绕过损伤位置向下传播,不利于损伤识别。当弹性波波长大于试件横截面尺寸时,会在试件中产生板波,对测试信号产生干扰。因此,笔者选择激振锤LT-10进行冲击回波测试。

### 3.3 冲击回波测点布置

测试前在轨枕上表面标记测线,考虑脱空损伤位置、宽度及边界处波的反射对识别的影响,长度方向距边缘2 cm开始,每4 cm标记一条测线,共10条;宽度方向距边缘3.5 cm开始,每4 cm标记1条测线,共3条,合计30个测点。冲击回波测试如图7所

示。为降低激振荷载对识别效果的影响,在专业技术人员指导下进行试验,保证测试表面的清洁平整,将加速度传感器按压在测点位置不晃动,使传感器与测点充分耦合,采用激振锤在测点附近 1 cm 的位置进行激振,使得每次敲击小锤的力度和高度相差不多,且每个测点取 3 个有效振动波形的平均值。当测点的加速度信号未显示周期性震荡衰减特征时,判断该信号无效,重新采样。



图 7 冲击回波测试  
Fig.7 Impact echo test

## 4 测试结果及分析

### 4.1 基于试件厚度分析的损伤识别

考虑到不同脱空位置、不同脱空尺寸下测点加速度对应的频谱图规律较为类似,故以中部脱空 15 cm 的复合试件为例,未损伤与损伤区域测点频谱对比如图 8 所示。

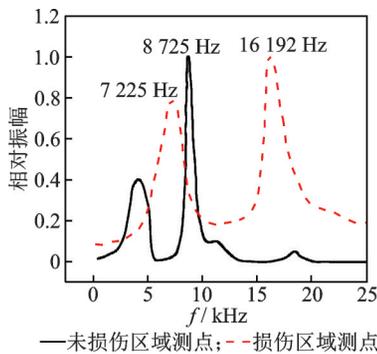


图 8 未损伤与损伤区域测点频谱对比

Fig.8 Spectrum comparison of measurement points in undamaged and damaged areas

依据式(5),弹性波波速标定值为 3 607 m/s,计算可得试件底部厚度 0.2 m 对应的峰值频率为 8 657 Hz,脱空位置厚度 0.1 m 对应的峰值频率为 17 314 Hz。由图 8 可知,对于未损伤区域测点,频谱图中的主要峰值频率为 8 725 Hz,对应试件底部的理论厚度频率,由于界面弹性波反射系数为 -0.03,不会引起明显反射,次峰的出现可能是表面波造成的<sup>[11]</sup>。对于脱空损伤区域测点,频谱图存在 2 个主

要的峰值频率,7 225 Hz 对应试件底部的理论厚度频率。由于弹性波在遇到脱空缺陷时,需要绕过缺陷才能继续往试件底面传播,导致传播路程增加,故其峰值频率略小于未损伤区域测点的峰值频率。16 192 Hz 对应试件脱空处的理论厚度频率,这主要是因为弹性波在脱空位置会产生反射,传播路径变短,频率较高。因此,基于损伤区域的测点频谱图中试件底部厚度频率会向低频移动,以及损伤处的频率会向高频漂移的原理,判断试件是否存在损伤。

基于标定好的弹性波波速和各测点振动加速度频谱图中的峰值频率,结合式(5)计算所有测点分别对应的厚度值,求均值可得到每种工况下复合试件的试验平均厚度。复合试件的理论平均厚度值  $h$  的计算式为

$$h = h_1 \frac{L_1}{L} + h_2 \frac{L - L_1}{L} \quad (6)$$

其中: $h_1$ 为脱空位置的深度,取 0.1 m; $L_1$ 为脱空损伤宽度; $h_2$ 为层间未损伤区域对应的试件厚度,取 0.2 m; $L$ 为复合试件长度,取 0.4 m。

将 9 个试件的试验平均厚度与理论平均厚度进行对比,分别计算两者差值的绝对值,以及各试件试验平均厚度与未损伤试件的理论平均厚度的差值。图 9 为试件试验平均厚度与理论平均厚度对比,图中的试件编号 1~9 与表 3 对应。

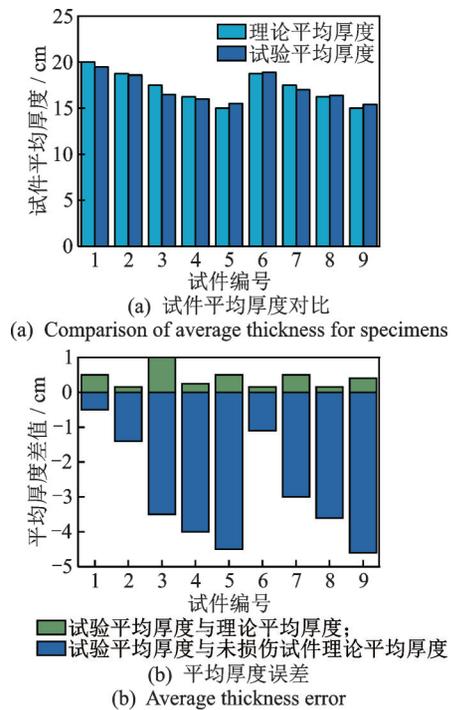


图 9 试件试验平均厚度与理论平均厚度对比

Fig.9 Comparison between experimental and theoretical average thickness for specimens

由图9可知,试件的试验平均厚度与理论平均厚度存在一定误差,这主要是因为混凝土复合试件材料的离散性会对弹性波传播造成影响,在抽出钢板模拟脱空损伤时,会对周边未损伤区域造成扰动,致使脱空损伤宽度与预设宽度存在差别。对不同脱空位置和脱空程度的试件,其试验平均厚度与理论平均厚度的误差均较小,在1.0 cm范围内。随着脱空宽度的增加,试件的试验平均厚度与未损伤试件的理论平均厚度的差值越大,测试结果与真实情况相符。因此,利用测试获取的试件平均厚度值可准确识别轨枕与道床板界面是否存在损伤,同时根据与无损伤试件理论平均厚度的差值可进一步判断损伤程度的大小,但无法确定损伤的具体位置。

#### 4.2 平面成像分析

结合轨枕上表面30个测点的振动响应,通过平面成像分析可反映轨枕与道床板界面情况,对脱空损伤位置进行准确识别。以未损伤、端部脱空15 cm和中部脱空15 cm为例,轨枕与道床板界面回波成像如图10所示。测点布置时,平行试件纵向的测线距离边缘3.5 cm,平行试件横向的测线距离边缘2 cm,故图中平面成像区域在纵向2~38 cm,横向3.5~11.5 cm。

由图10可知,通过轨枕与道床板界面的冲击回波成像分析可准确识别损伤区域范围,判断脱空损伤程度,且对不同损伤位置和损伤程度的识别效果

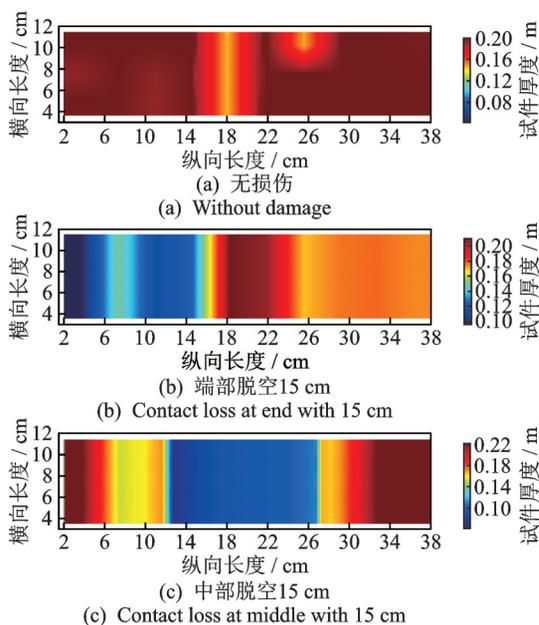


图10 轨枕与道床板界面回波成像

Fig.10 Echo imaging of the interface between sleeper and track slab

较好。由于在界面损伤与未损伤的过渡区域,弹性波的反射和折射加剧了传播的复杂程度,相应地在厚度云图中出现了色调过渡区。对于无损伤试件,其界面回波成像图中绝大部分显示为红色,对应厚度值约为0.2 m,表明轨枕与道床板接触面无损伤。对于端部脱空15 cm和中部脱空15 cm的试件,未损伤和损伤区域对应的厚度值云图显示略有不均匀,未损伤区域大多为红色、橙色和黄色,其厚度值均在0.2 m附近;损伤区域基本为蓝色,厚度值在0.1 m左右。此外,测试结果还表明双块式轨枕中嵌入的钢筋对界面损伤识别几乎无影响。

## 5 结论

1) 当双块式轨枕与道床板出现损伤后,冲击弹性波在界面处主要发生反射,而无损伤条件下主要发生折射,对弹性波不同传播规律下的回波信号进行频谱分析可以实现界面损伤识别。

2) 不同质量的激振锤激发的弹性波频率范围不同,应预先判断结构损伤易发生位置,结合理论计算选取合适的激振锤。对于本研究浇筑的复合试件,其界面脱空损伤距离表面10 cm,为避免波长过长的弹性波绕过缺陷向下传播,影响损伤识别精度,选取可激发弹性波波长为10 cm的LT-10激振锤。

3) 根据测点回波信号频谱分析获取的试件试验平均厚度与理论平均厚度相差仅为1 cm,且随着脱空宽度的增加,试件的试验平均厚度与未损伤试件的理论平均厚度的差值越大,表明测试结果较为合理,利用试件测试平均厚度可识别轨枕与道床板界面是否存在损伤及损伤程度。

4) 由于弹性波在界面损伤与未损伤的过渡区内传播复杂、试件材料的非匀质性,因此轨枕与道床板界面的冲击回波成像局部不均匀,但可较为准确地识别界面不同脱空位置和程度的损伤范围,验证了冲击回波法在双块式无砟轨道层间损伤识别中的可行性。

## 参 考 文 献

- [1] 杨荣山,段玉振,刘学毅. 双块式无砟轨道轨枕松动对轮轨系统动力性能影响研究[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(5): 13-18.  
YANG Rongshan, DUAN Yuzhen, LIU Xueyi. Influence induced by sleeper looseness of bi-block slab track on dynamic property of wheel-track system[J]. China

- Railway Science, 2014, 35(5): 13-18. (in Chinese)
- [2] 马殿东. 高速铁路多层线下结构病害探地雷达检测技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- [3] 舒志乐,朱思宇,张华杰. 无砟轨道CA砂浆层病害探地雷达检测及三维正演模拟[J]. 铁道科学与工程学报,2021, 18(7): 1679-1685.  
SHU Zhile, ZHU Siyu, ZHANG Huajie. Ground penetrating radar detection and three-dimensional forward modeling of CA mortar layer disease on ballastless track [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(7): 1679-1685. (in Chinese)
- [4] YANG Y, ZHAO W G. Curvelet transform-based identification of void diseases in ballastless track by ground-penetrating radar [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2019, 26(8): 1-18.
- [5] XU J M, WANG P, AN B Y, et al. Damage detection of ballastless railway tracks by the impact-echo method [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 2017, 171(2): 1-9.
- [6] TIAN X S, ZHAO W G, DU Y L, et al. Detection of mortar defects in ballastless tracks of high-speed railway using transient elastic wave method [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2018, 8(10): 1-10.
- [7] JIANG W, XIE Y J, WU J X, et al. Influence of age on the detection of defects at the bonding interface in the CRTS III slab ballastless track structure via the impact-echo method [J]. Construction and Building Materials, 2020, 265: 1-12.
- [8] 姜勇,吴佳晔,马永强,等. 冲击回波声频法用于铁路隧道衬砌质量检测[J]. 铁道建筑,2020, 60(5): 6-10.  
JIANG Yong, WU Jiaye, MA Yongqiang, et al. Application of impact echo acoustic method in quality testing of railway tunnel lining [J]. Railway Engineering, 2020, 60(5): 6-10. (in Chinese)
- [9] ZHU J Y, POPOVICS J. Imaging concrete structures using air-coupled impact-echo [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2007, 133(6): 628-640.
- [10] 洪康,李耀东,周泽源,等. 双块式无砟轨道轨枕脱空对动水压强的影响[J]. 铁道建筑,2013(12):109-112.  
HONG Kang, LI Yaodong, ZHOU Zeyuan, et al. Influence of double-block ballastless track sleeper voiding on hydrodynamic pressure [J]. Railway Engineering, 2013(12): 109-112. (in Chinese)
- [11] 姚菲,陆幸奇,陈光宇. 基于冲击回波法的混凝土-围岩缺陷检测与信号处理研究[J]. 铁道科学与工程学报,2021, 18(9): 2316-2323.  
YAO Fei, LU Xingqi, CHEN Guangyu. Experimental and signal processing research on concrete-rock structural defects by impact-echo method [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(9): 2316-2323. (in Chinese)
- [12] 张雯皓. 基于压电陶瓷的双块式轨枕与道床板界面损伤识别[D]. 成都:西南交通大学,2020.
- [13] 张景奎,崔德密. 冲击回波法检测混凝土结构厚度与缺陷的试验研究[J]. 长江科学院院报,2018, 35(2): 125-128,134.  
ZHANG Jingkui, CUI Demi. Experimental study on detecting thickness and defects of concrete structure by impact-echo method [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(2): 125-128, 134. (in Chinese)
- [14] 吴佳晔,谢永江,李化建,等. 基于弹性波的无砟轨道板脱空无损检测方法:中国,CN201510170451.4[P]. 2017-04-05.



**第一作者简介:**许雪山,男,1997年8月生,硕士生。主要研究方向为无砟轨道结构隐蔽损伤识别。曾发表《Deep learning-based fast detection of apparent concrete crack in slab tracks with dilated convolution》(《Construction and Building Materials》2022, Vol.329)等论文。  
E-mail: xueshan@my.swjtu.edu.cn

**通信作者简介:**任娟娟,女,1983年7月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为高速铁路无砟轨道结构设计理论与损伤机理。  
E-mail: jj.ren@home.swjtu.edu.cn