

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqyfh.240154

# 旧水泥路面共振破碎技术的施工环境效应研究

朱晓辉<sup>1</sup>, 刘扬霖<sup>1</sup>, 刘成<sup>2</sup>, 周海生<sup>2</sup>

(1. 赣州市公路建设服务中心, 江西 赣州 341000; 2. 上海万广建设发展有限公司, 上海市 201110)

**摘要:** 共振破碎技术作为面向旧路面改造加铺的处治技术, 将旧混凝土板块充分破碎形成紧密嵌挤、具有较高承载力的共振破碎层。但共振破碎技术的环境效应尚不明确。以上海和赣州多条由共振破碎技术改建加铺的旧混凝土路面为依托, 对共振破碎施工的振动、噪声等环境效应进行研究, 明晰其分布特征与衰减规律, 并提出了相应的防护措施。结果表明: 在距离振源 0~5 m 范围内共振破碎造成的环境振动的影响达到最大, 距离振源 15 m 外时环境振动带来的影响可以忽略不计。在共振破碎施工噪声源 20 m 范围内, 环境噪声达到 100 dB 以上, 会对人体听力造成严重损伤; 在 100 m 范围内, 噪声值达到 85 dB 以上, 影响沿线居民的正常生活; 100 m 外为昼间环境噪声可接受范围; 300 m 外为夜间环境噪声的可接受范围。

**关键词:** 旧水泥混凝土路面; 共振破碎技术; 环境效应; 防护措施

中图分类号: U416.2

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)01-0193-05

## Research on Construction Environmental Effects of Resonance Crushing Technology for Old Cement Pavement

ZHU Xiaohui<sup>1</sup>, LIU Yanglin<sup>1</sup>, LIU Cheng<sup>2</sup>, ZHOU Haisheng<sup>2</sup>

(1. Ganzhou Highway construction Service Center Ganzhou 341000, China;

2. Shanghai Wanguang Construction Development Co., Ltd., Shanghai 201110, China)

**Abstract:** As a treatment technology for the reconstruction and overlaying of old pavement, the resonance crushing technology is used to fully crush the old concrete slabs to form a resonance crushed layer with the tight embedded and high bearing capacity. However, the environmental effects of resonance crushing technology are not yet clear. Relying on the old concrete pavements reconstructed and overlaid by the resonance crushing technology in Shanghai and Ganzhou, the environmental effects of vibration and noise during the resonance crushing construction are studied to clarify the distribution characteristics and attenuation laws of the effects, and the corresponding protective measures are proposed. The results show that the impact of environmental vibration caused by resonance crushing reaches its maximum within a range of 0~5 m from the vibration source, and the impact caused by the environmental vibration can be ignored at 15 m away from the vibration source. Within a 20 m range of resonance crushing construction noise source, the environmental noise will reach over 100 dB, which will cause serious damage to human hearing. Within a 100 m range, the noise level reaches over 85 dB, which affects the normal life of residents along the route. The environmental noise outside 100 m during the day can be accepted, and the environmental noise outside 300 m at night can be accepted.

**Keywords:** old cement concrete pavement; resonance crushing technology; environmental effects; protective measures

## 0 引言

水泥路面是我国公路的主要铺装形式之一。据 2022 年中国统计年鉴统计<sup>[1]</sup>, 截至 2021 年年底, 全国公路总里程 528.07 万 km。目前, 我们水泥路面已超

过 230 万 km, 占比超过 43.6% 以上。水泥路面长期的运营过程中, 在交通荷载和各种自然因素长时间综合作用下, 不可避免地将产生错台、脱空、断板断角等病害, 道路服务水平下降, 特别是早期建设的水泥路面的病害尤为严重, 因此目前需修复的旧水泥混凝土路面比例越来越高。

面向产生相对严重病害的水泥路面维修改造工程, 共振破碎技术将原水泥板块充分破碎并形成一层紧密嵌挤、具有较高承载力的碎石层, 相较于传统

收稿日期: 2024-02-04

作者简介: 朱晓辉(1985—), 男, 学士, 高级工程师, 从事公路建设管理工作。

通信作者: 刘成(1983—), 男, 本科, 工程师, 从事路桥建设管理工作。电子邮箱: 13917062155@163.com

的冲击破碎和打裂压稳技术而言,具有对施工迅速、路基及周边影响小等的优点。近年来,国内外学者们针对共振破碎技术的研究方向主要集中在施工工艺研究<sup>[2-4]</sup>和加铺层理论设计<sup>[5-6]</sup>等方面。但共振破碎技术的环境效应尚不明确,目前仍缺少面向共振破碎施工环境振动效应的监测手段,对施工过程中的振动破坏进行合理的评估,避免施工对道路周边建筑物与管线等结构物造成损害。除了环境振动效应之外,共振破碎施工时带来的噪声污染与空气污染也不容忽视<sup>[7]</sup>。

本文通过对实体工程破碎施工过程的监测,对共振破碎施工过程中的振动效应、噪声污染与扬尘危害进行评估,分析振动和噪声的衰减规律,并基于此提出实现减少排放、环境友好型的施工方案,期望对共振破碎施工具有一定的指导价值。

## 1 环境效应的检测方法

### 1.1 共振破碎施工环境振动检测

本文采用共振破碎振动检测系统对共振碎石化施工过程所产生环境振动进行现场检测。检测系统根据上海澄科公司的单通道振动测试测量系统改良,主要由CT1010LC压电式加速度传感器(100 mV/g灵敏度、0.5~5 000 Hz频率范围)、CT5201恒流适配器(放大倍数X1/X10,精度误差小于1%)、USB-231型数据采集卡(8单端/4差分,采样率100 ks/s)、计算机和数据处理软件DAQami等,系统组成见图1。

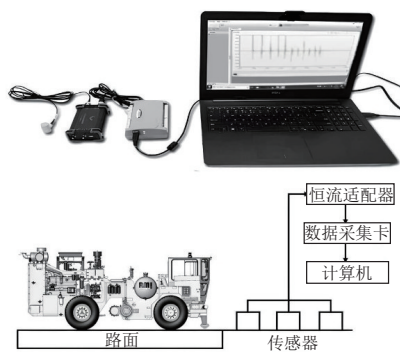


图1 共振破碎振动检测系统

本文选取江西赣州大余G323国道、定南S457省道和上海市青浦区章练塘路的试验道路,以旧水泥混凝土板块(板边和板中)、路肩、周边路侧建筑物、桥涵结构与路边的管线为目标物,共计对35处点位对共振破碎施工设备前进过程的环境振动数据进行检测。现场施工的共振破碎机为CB-900型,代表了梁式振动破碎机,发动机功率630 hp。检测过程中控制共振破碎机的施工参数保持常规状态:振动频

率41 Hz,振幅1.3 cm,锤头无额外配重,设备前进速率约1 m/s。

在完成现场检测后,对原始数据的波谱图进行识别和处理,将测量所得的电压信号转化为被测机械量(加速度)与时间的波谱,去掉杂波并过滤噪点,对波谱的峰面积进行两次积分得到观测点的振幅时间波谱图。

### 1.2 共振破碎施工噪声检测

本文使用专业级声级计与红外测距仪对共振破碎施工的环境噪声进行检测。由一名人员使用声级计检测噪声并记录,另一名人员使用红外测距仪测量噪声源与观察者的距离并读数记录。声级计的分辨率为0.1 dB,频率响应范围31.5~8.5 kHz,红外测距仪测试精度0.1 m,设备见图2。



图2 专业级声级计

本文选取大余县G323国道大合镇K207+400~K207+820路段进行观测,在共振破碎设备施工时,分别在城镇地带与郊外地带距离噪声源不同距离处,以声级计采集施工噪声分贝值(dB)。噪声检测采用国内外常用A声级评价环境噪声,A计权网络测得的噪声值易于测量,且较接近于人耳感觉,可直观反应人对噪声的感受。

## 2 共振破碎施工的振动效应

### 2.1 环境振动的空间特征

为探究环境振动的空间衰减特征,本文选取了水泥面板上的观测点A,观测共振破碎机施工以正常施工速率(固定为约1 m/s)前进的整个过程,现场布设示意图图3。

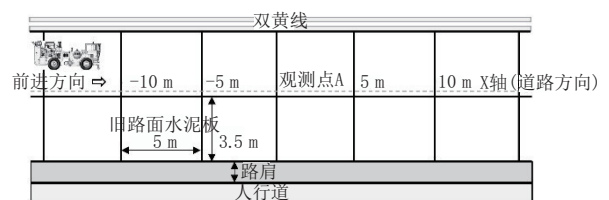


图3 现场点位布设示意图

振幅变化沿道路前进方向关系见图4。

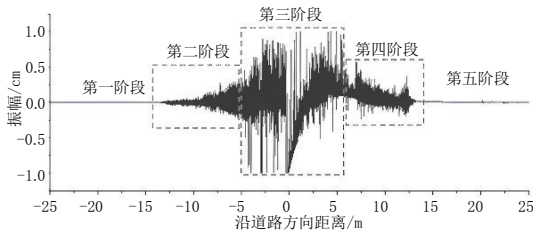


图4 测点A振幅变化图

基于环境振动振幅的分布特征,本文根据振幅变化特征划分为5个阶段。

第1阶段:无影响阶段。该阶段从设备启动开始,到设备行驶至与观测点A在道路前进方向上相距-15 m处。在此阶段,观测点振幅不超过0.02 cm(不足最大振动峰值的2%),影响可以忽略不计。

第2阶段:振动增强阶段。与观测点A水相距-15 m开始,到-5 m结束。此阶段,观测点的振幅值从0 cm逐渐稳定增加到了0.3 cm。

第3阶段:振动峰值阶段。从与观测点A水相距-5 m开始,到+5 m处。此阶段,观测点振动最为剧烈,振幅值范围为0.3~1.0 cm。其中在0 m处的波谱出现跳动,是由观测装置在路面上轻微跳起所致。

第4阶段:振动衰减阶段。从与观测点A水相距+5 m到与其相距+15 m处。此阶段观测点振幅值从0.3 cm逐渐降低到0 cm,与第二阶段镜像。

第5阶段:无影响阶段。与第一阶段相同。

## 2.2 振动衰减规律

我国学者杨先健<sup>[8]</sup>总结国内外经验,通过大量实验分析对G.Bornitz公式进行修正,提出了基于振源、土基、几何阻尼项(振源距离)、材料阻尼项(能量吸收系数)等影响因素的面振源的地面振幅衰减的计算公式:

$$A_r = A_0 \sqrt{\frac{r_0}{r}} [1 - \varepsilon(1 - \frac{r_0}{r})] \times \exp[-af(r - r_0)] \quad (1)$$

式中: $A_r$ 为观察点的竖向振幅,m; $A_0$ 为振动源的振幅,m; $R$ 为观察点与振动源中心的距离,m; $r_0$ 为振动源的半径,对于矩形或正方形采用当量半径计算,m; $\varepsilon$ 为与振动源面积有关的几何衰减系数,无量纲; $a$ 为材料阻尼的能量吸收系数; $f$ 为振动源的频率,稳态振动为扰频,瞬态振动为固有频率,Hz。

而对于冲击破碎施工的衰减特性,建议采用式(2)进行预估:

$$V = 0.2(2gh)^{0.5}(r/r_0)^{-1.7} \quad (2)$$

式中: $g$ 为重力加速度,根据各地重力加速度取

值, $m/s^2$ ;  $h$ 为夯击高度,m; $r/r_0$ 为夯锤半径归一化后的距离。

设定距振源1.5 m的振动幅度为100%,根据上述关系式计算不同距离下的振幅衰减量,将得到的理论衰减规律与实测衰减规律进行比较,见表1。

表1 实测衰减与理论衰减量对比 单位:%

距离振源距离/m	1.5	3	5	10	15
实测衰减量	100	70	30~60	8	4
地面振幅公式	100	64.7	47.0	17.6	11.8
冲击破碎公式	100	43.3	12.9	4	2

由表1可知,在近距离范围内(0~5 m),共振破碎施工的环境振动的衰减量与地面振幅公式的理论衰减量接近;而在较远距离上,共振破碎层施工的环境振动衰减速度要快于地面振幅公式的理论计算值。其原因是公式中假设衰减发生在均一的材料上,而实测环境中旧混凝土路面、路肩与人行道具有不同的材料与结构,因此振幅的衰减量会更大,将实测数据及其回归公式绘制为图5,发现实测的共振破碎施工环境振动振幅值近似于指数函数的形式快速衰减。

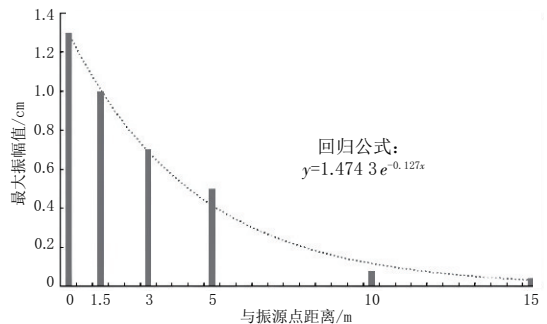


图5 环境振动的空间衰减规律

综上,总结出环境振动的空间衰减规律如下:共振破碎施工的环境振动振幅值近似于指数函数的形式快速衰减。距离振源(共振锤头)15 m以外时,环境振动的影响几乎可以忽略不计;在距离振源0~15 m范围内(3块水泥板的长度),环境振动的影响无法忽略;在距离振源0~5 m范围内(1块水泥的长度),环境振动的影响达到最大。

## 2.3 振动破碎效应与防护距离

共振破碎施工造成的环境振动破坏主要考虑两个方面的影响,一是对人的影响,二是对周边结构物的影响。施工应当既要保证建筑物的安全,同时还要考虑当地居民承受能力的范围。

共振破碎施工的环境振动对人体造成的影响可以分为物理效应和效应两类:物理效应是指振动产生的运动和位移所引起的机械干扰、损伤作用和次



生效应;而生物效应包括生理效应和心理效应,生理效应有头晕、呕吐、神经紊乱等身体现象,心理效应则是指烦躁、痛苦、工作效率下降等心理现象。从共振频率上分析,共振破碎施工的频率范围为40~50 Hz,而人体中重要的头颈部位的固有频率范围20~30 Hz,胸腹部位的固有频率范围3~6 Hz,均在低频振动的范围中。头颈的骨头固有频率与共振频率接近,因此施工过程对于人体头颈可能会有不利影响,有必要对现场的施工人员采取防护措施,配备好隔音耳罩并保持一定的安全距离;对于设备操作人员,应当采取轮班的形式,单次作业不建议超过30 min。

在《公路冲击碾压应用技术指南》<sup>[9]</sup>中,针对结构物的防护提出要求:施工前应当查明冲击范围内的地下管线以及附近各种结构物,并根据结构物的类型选取相应的防护标准,防护距离见表2。由表2可知,建筑物的冲击振动安全距离30 m远大于本文给出的环境振动无影响区域距离15 m,结合安全距离参考值与环境振动衰减规律,本文提出建筑物的共振破碎安全距离参考值为15 m,而立交桥、电线杆、桥台、管线与挡土墙等结构的安全距离参考值可以放低标准至5 m。

表2 冲击振动安全距离参考值<sup>[9]</sup> 单位:m

结构物类型	安全距离	结构物类型	安全距离
建筑物	30	涵洞、U形桥台	5
互通式立交桥	10	重力式挡土墙	2
导线点、电线杆	10	悬臂式挡土墙	2.5
其他类型桥台	10	地下管线	5

在共振破碎施工过程中应当对道路的不利路段全程进行振动监测,明确共振破碎的应力波所引起的环境振动特征,并计算振动安全距离。在建筑物密集或地下结构物复杂的不利于施工路段,应当进行避让或是用小型破碎设备代替共振破碎机施工。当出现难以避让或是无设备可替换时,现场条件如不满足最小振动安全距离参考值,可采用设置的隔震沟(宽约0.5 m、深约1.5 m)的形式进行主动的隔振防护。

### 3 共振破碎施工的噪声效应

#### 3.1 噪声衰减规律

共振破碎的环境施工噪声检测结果见图6和表3。当共振破碎施工进行时,环境噪声值随着与噪声源距离的增加而降低,在100 m的范围内,由110 dB逐渐降至80 dB。对比图6可知,城镇地段的施工噪声

值略低于开阔地带的施工噪声值约5~10 dB,城镇地带的房屋起到了减弱环境噪声传播作用。在未施工状态下,环境噪声值在60~70 dB;当路段上车辆快速通过时,噪声值达到80 dB,在车辆鸣笛时的噪声值达到90~95 dB。

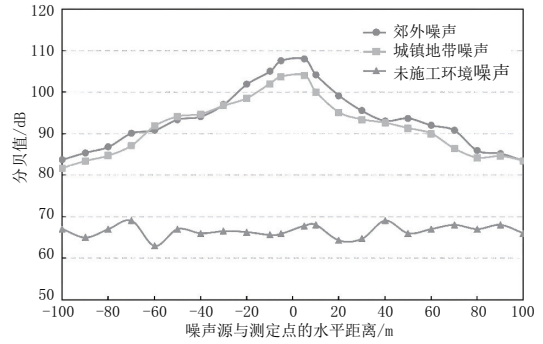


图6 环境噪声衰减规律

表3 未施工环境噪声监测值 单位: dB

环境状态	噪声值			
	最大值	最小值	平均值	标准差
无车辆状态	67.2	62.1	66.5	2.25
车辆快速通过	74.2	80.0	77.8	2.39
汽车鸣笛	91.6	95.2	94.2	1.51
设备驾驶室	114.3	110.6	112.7	1.10

波在空气中传播时,由于空气的黏性和热传导作用,声波压缩和膨胀过程使一部分声能被转化为热能损耗掉,这种吸收称为经典吸收。经典吸收与空气的温度、湿度及气压等有关,在噪声控制工程中,声波在20℃的空气中传播的声压级衰减量近似计算公式如下:

$$A_{am}(20\text{ }^{\circ}\text{C}, \phi) = 7.4 \times \frac{f^2 r}{\phi} \times 10^{-8} \quad (3)$$

式中: $A_{am}$ 为声压级的衰减量,dB; $f$ 为声波的频率,Hz; $r$ 为声波的传播距离,m; $\phi$ 为空气的相对湿度。

尽管不同形式的声源噪声衰减形式有所不同,但根据噪声声级的计算与点声源衰减规律可以得到噪声衰减计算的经验公式。

$$\Delta L = 10 \log\left(\frac{1}{4\pi r^2}\right) \quad (4)$$

式中: $\Delta L$ 为距离增加产生衰减量,m; $r$ 为点声源至受声点的距离,m。

将不同距离的声源代入式4中,可得到式(5)。

$$\Delta L = 20 \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (5)$$

式中: $r_1$ 为初始受声点的位置,m; $r_2$ 为终止受声点的位置,m。

由上述公式可知:噪声在空气中传播距离每增加1倍,约衰减6 dB。对于振动对环境噪声的影响

通常采用国家标准《城市区域环境振动标准》(GB 10070—1988)<sup>[10]</sup>和《城市区域环境振动测量方法》(GB 10071—1988)<sup>[11]</sup>,以A声级作为相应的评价指标,该指标适用于连续发生的稳态振动、冲击振动和无规则振动,噪声标准值见表4。

表4 冲击振动噪声规范标准 单位: dB

测试项	昼间	夜间
噪声标准值	<75	<72
容许超过最大值	10	3

由表4取85 dB作为昼间可接受的环境噪声的上限值,取75 dB作为夜间可接受的环境噪声的上限值。取110 dB距离噪声源5 m处的噪声代表值,那么由式(4)计算得出:昼间达到噪声上限值的间隔距离 $r_1=100$  m,夜间达到噪声上限值的间隔距离 $r_2=300$  m,得到共振破碎施工噪声衰减规律见图7。

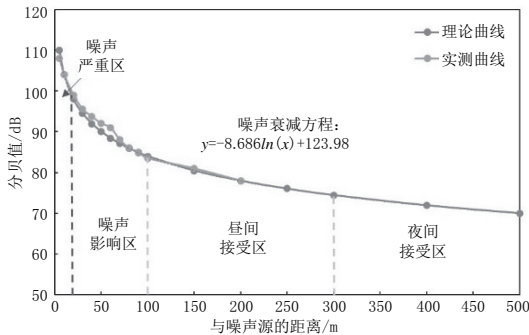


图7 共振破碎施工噪声衰减规律

可见,距离噪声源100 m以上时,共振破碎施工噪声值衰减至昼间可接受噪声的上限值85 dB;距离噪声源300 m以上时,噪声值衰减至夜间可接受噪声的上限值75 dB。

### 3.2 噪声防护措施

共振破碎施工产生的环境噪声危害较大,噪声污染不容忽视。结合图8可知,从施工噪声的声级来看,距振动源(即共振破碎锤头)20 m的空间范围内,噪声值达到100 dB以上,对人体的听力造成损害;在距振动源50 m的空间范围内,共振破碎的噪声值达到90 dB以上,与汽车鸣笛声持平,对道路沿线居民的生活带来巨大影响,有必要采取降噪措施或是避免人群密集的高峰时段进行施工。此外,施工时共振破碎设备驾驶室内的噪声值可达110~115 dB,长时间共振破碎施工会对驾驶员的听力造成严重损伤。

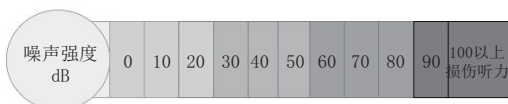


图8 噪声级别数值表

基于上述噪声衰减规律与相关规范要求,针对共振破碎施工提出以下防护措施。

(1)对共振破碎设备的驾驶员采取严格保护,避免长期处于恶劣噪声工作环境下对听力造成损害,建议严格控制单次工作时间在30 min内,佩戴隔音耳罩进行作业,并采取轮流作业的形式,降低噪声带来听力与健康损害。

(2)施工过程中,应注意噪声对沿线居民的影响,提前做好施工通告与隔离,减少共振设备20 m范围内的无关人员,避免施工噪声带来的听力损伤。

(3)当施工范围100 m内有学校、居民区等设施时,应避开工作时间施工作业,此外尽量避免在夜间城镇内进行施工。

(4)无法避免上述情况时,应当设置隔音板等降噪设备,降低对沿线居民正常生活的影响。

## 4 结语

本文以上海和赣州多条由共振破碎技术改建加铺的旧混凝土路面为依托,对共振破碎施工过程的环境振动和噪声等环境效应进行现场检测,分析其分布特征,明确其衰减规律,得到结论如下。

(1)共振破碎的环境振动特征:在距离振源0~5 m范围内(水泥路面区域),共振破碎造成的环境振动的影响达到最大;在5~15 m的范围内,共振破碎引起的环境振动无法对行人和建筑结构造成较大的影响;距离振源15 m外时,环境振动带来的影响可以忽略不计,因此设置共振破碎安全距离参考值为15 m。路肩、人行道等与水泥路面非刚性连接的结构可以有效降低环境振动的强度。

(2)共振破碎施工的噪声衰减规律:在噪声源20 m范围内,共振破碎施工的环境噪声达到100 dB以上,会对人体听力造成严重损伤;在100 m范围内,噪声值达到85 dB以上影响沿线居民的正常生活;100 m外为昼间环境噪声可接受范围,300 m外为夜间环境噪声的可接受范围。

### 参考文献:

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴2022[M]. 北京: 中国统计出版社, 2000.  
 [2] Missouri Department of Transportation. Missouri Guide for Pavement Rehabilitations[Z]. Missouri: Missouri Department of Transportation Research, Development and Technology, 2002.  
 [3] Asphalt Overlays for Highway and Street Rehabilitation. Manual Series 17 (MS-17) [M]. Princeton: Asphalt Institute, 2000.  
 [4] National Asphalt Pavement Association. Guidelines for use of HMA overlays to rehabilitate PCC pavement[M]. Princeton: National Asphalt Pavement Association, 1994.

(下转第215页)