

# 沉管隧道基础灌砂的实时无损检测试验研究<sup>\*</sup>

王海龙<sup>1</sup>, 吴刚<sup>2</sup>, 沈永芳<sup>2</sup>, 车爱兰<sup>3</sup>, 王兆卫<sup>2</sup>

(1. 南昌市政公用投资控股有限责任公司, 南昌 330029; 2. 上海交大海洋水下工程科学研究院有限公司, 上海 200231; 3. 上海交通大学 土木工程系, 上海 200240)

**摘要:** 灌砂法已成为沉管隧道基础处理的主要施工方法, 在灌砂过程中实施监测并对灌砂效果进行评价对确保基础灌砂施工质量显得尤为必要。本文依托南昌红谷隧道工程等比例基础灌砂模型试验, 采用冲击映像法和全波场法相结合的无损检测方法, 对灌砂前、灌砂后以及灌砂过程中砂积盘的扩散状况进行了监测。通过在不同灌砂工况下波形、时频以及成像剖面的分析, 比较平均冲击响应强度的变化, 建立起沉管隧道基础灌砂施工的实时无损检测方法。通过定义充盈率指标, 实现对灌砂施工效果的定量评价。本试验研究成果将为实际沉管隧道基础灌砂施工的监测提供依据与技术支持。

**关键词:** 沉管隧道; 基础灌砂; 实时; 无损检测

中图分类号: U456.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)05-1170-09

## Experimental Research on Real Time Nondestructive Detection for the Filling Sand Foundation of Immersed Tunnel

Wang Hailong<sup>1</sup>, Wu Gang<sup>2</sup>, Shen Yongfang<sup>2</sup>, Che Ailan<sup>3</sup>, Wang Zhaowei<sup>2</sup>

(1. Nanchang Municipal Public Group, Nanchang 330029, P.R. China; 2. Shanghai Jiaotong University Underwater Engineering Institute Co., Ltd., Shanghai 200231, P. R. China; 3. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, P. R. China)

**Abstract:** The filling sand method has become the main construction method of foundation treatment for immersed tunnel. It is particularly necessary that the implementation of monitoring in the filling sand process and the evaluation of filling sand effect will ensure foundation construction quality. Based on the same-scale filling sand model test of Nanchang Honggu Tunnel, the diffusion state of sand deposit is monitored before filling sand, after filling sand and in filling sand process using non-destructive detection method combining impact image method and full wave field method in this paper. The waveform, frequency and imaging section are analysed and compared with an average impact response intensity changes under different filling sand conditions. The real-time non-destructive detection method for foundation construction of immersed tunnel is established. By defining the filling rate index, the quantitative evaluation of filling sand construction effect is realized. The results of this study will provide the basis and technical support for monitoring the actual filling sand construction of immersed tunnel foundation.

**Keywords:** immersed tunnel; filling sand foundation; real time; non-destructive detection

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2018-04-27 (修改稿)

作者简介: 王海龙 (1981-), 男, 江西信丰人, 学士, 高级工程师, 主要从事工程项目管理工作。

E-mail: 6953268@qq.com

通讯作者: 吴刚 (1962-), 男, 重庆人, 工学博士, 研究员, 主要从事岩土力学与隧道工程领域的科研工作。

E-mail: wugang@sjtu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (41572255); 上海市自然科学基金 (15ZR1423300)

## 0 引言

在沉管隧道中,灌砂法已成为沉管隧道基础处理的主要施工方法<sup>[1]</sup>。为确保基础灌砂施工质量,有必要对灌砂过程进行监测并对灌砂效果进行分析与评价。

当前,有关管段灌砂基础施工的控制与监测方法大多为经验性的,在实际应用中存在较多局限性。因此,采用无损检测方法对于沉管隧道基础灌砂施工具有重要意义<sup>[2]</sup>。针对具体工程,无损检测技术已在沉管隧道基础质量检测与评价方面做出了有益的探索。杨钢宇等<sup>[3]</sup>将超声波模拟技术应用于宁波甬江隧道水底基础的质量检测。沈永芳等<sup>[4]</sup>、李源等<sup>[5]</sup>和车爱兰等<sup>[6]</sup>采用探地雷达和表面波法分别对沈家门海底沉管隧道、天津海河沉管隧道压浆基础的充填效果进行检测,并提出了相关评价标准。冯少孔等<sup>[7]</sup>应用冲击映像技术对双向预应力混凝土立墙进行检测,通过有限元法数值模拟和取芯检验,验证了检测和分析结论。李邦旭等<sup>[8]</sup>和陈润<sup>[9]</sup>通过等比例试验模型,建立了弹性波映像法与 Rayleigh 面波法相结合的无损检测方法,并判识沉管隧道砂基础中的缺陷以及检测砂基础的密实度。目前,有关无损检测技术在沉管隧道基础灌砂质量检测中的应用文献较为少见。

本文依托南昌红谷隧道工程等比例灌砂模型试验<sup>[10]</sup>,采用冲击映像法和全波场法实时监测灌砂过程中砂积盘的扩散状况,建立了沉管隧道基础灌砂施工实时检测与灌砂效果评价方法,为沉管隧道基础灌砂施工监测提供了技术支持,确保了灌砂施工的质量。

## 1 无损检测方法及其仪器

### 1.1 检测原理与方法

基础灌砂无损检测采用基于弹性波场的冲击映像法和全波场法。

冲击映像法与石油勘探用的反射法地震勘探相类似。通过敲击沉管隧道的底板表面,将产生弹性波。弹性波到达沉管隧道底板底面与灌砂结合面会发生反射,反射波的强弱可以反映灌砂的充填情况。当砂与沉管底板紧密结合时,边界两侧介质物理参数差别较小,形成弱反射界面;当砂与沉管

底面之间有间隙时,边界的两侧为水和沉管底板,由于其物理参数差别大,会形成强反射面,接收到的弹性波很强,能量较大,如图 1 所示。

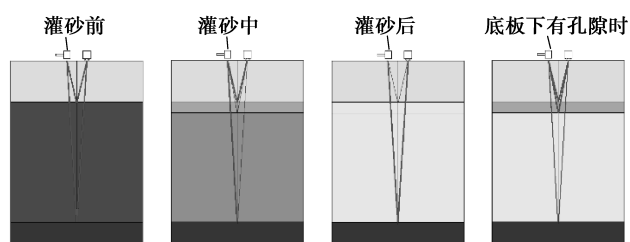


图 1 各工况下冲击映像法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of impact imaging method under different conditions

全波场法是一种全方位、全频带、全分量、高保真的矢量地震检测方法。当对介质进行激励时,介质表面会激发产生面波、纵波和横波。弹性波遇到界面会产生反射,反射波的强弱反映灌砂充填情况。当形成弱反射界面时,弹性波能量损失较多,反射波能量小,振幅就较小;当形成强反射面时,反射波能量较大,波形振幅也大。研究表明,激发获得的各种波中,P 波能量最大,SH 波最为敏感(即与测线及敲击方向想垂直的波形分量最为敏感)。对于圆柱形震源(较重的铁锤),当施加横向激励时,激发获得的主要为 SH 波。

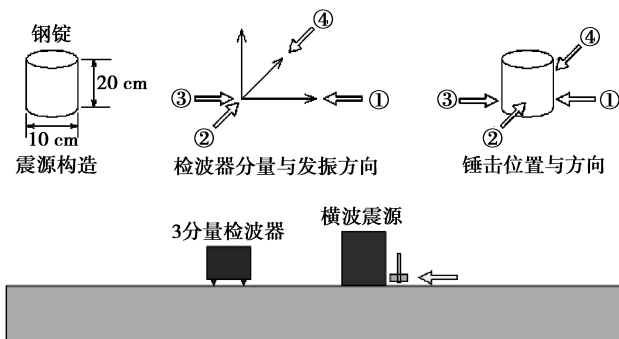


图 2 全波场法检测示意图

Fig. 2 Schematic diagram of full wave field detecting method

图 2 中,当沿①、③方向敲击时,②、④方向分量的波最为敏感。采用三分量检波器,接收得到②、④方向的横波,对横波进行后处理,可以很好地推测介质界面的结合情况。

### 1.2 检测仪器

整套检测系统由数字地震仪、检波器、主电缆、激发器、外接计算机、电瓶等组成。其主要技术指标如表 1。

表 1 检测仪器及其主要技术指标  
Table 1 The detecting instruments and their main technical indexes

名称	产家	主要技术指标
地震仪	美国 Geospace	24 通道, 24 bit 模数转换, 低截频 10 Hz, 高截频 10 000 Hz, 最小采样间隔 0.02 ms。
检波器	重庆地质仪器厂	固有频率为 200 Hz 的动圈式垂直分量速度型检波器及动圈式三分量速度型检波器。
笔记本电脑	中国联想公司	安装有 Geosismic、Surfstar 等软件。
大线(电缆)	中国	地震勘探用 27 芯信号电缆。
冲击锤	中国	质量 100 g 的硬质金属锤。
铁锭	中国	高 10 cm, $\phi 20$ cm, 25 kg。

1.3 灌砂模型及测线布设

本灌砂无损检测试验通过南昌红谷隧道等比例灌砂模型实施。该灌砂模型为底部与四周封闭且上部开口的钢筋混凝土结构模型。其底板按矩形设置 4 个灌砂孔, 其中灌砂孔 A 和 B 及 C 和 D 间距均为 9.5 m, 灌砂孔 A 和 D 及 B 和 C 间距均为 11 m, 与实际管节中灌砂孔间距相同。其底板上设置高强有机玻璃观测窗以及布设的压力盒。灌砂模型的平面布置如图 3 所示。

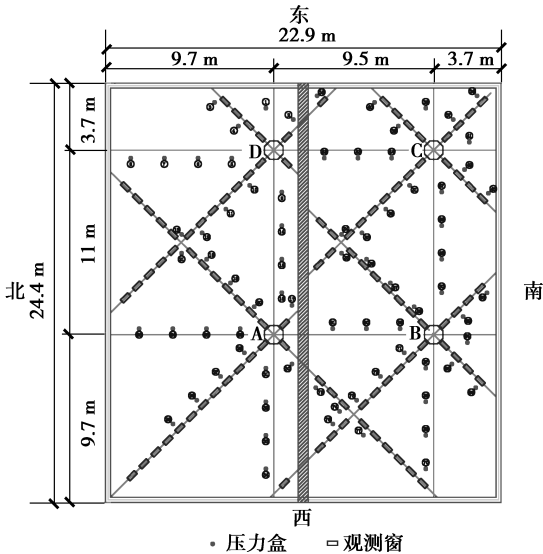


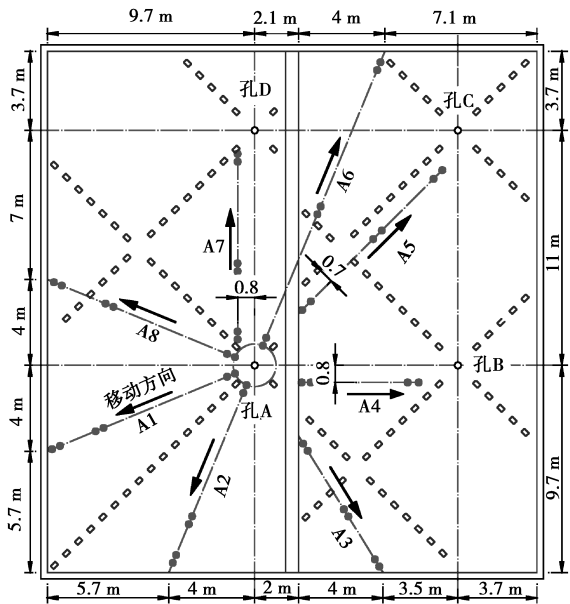
图 3 灌砂模型及观测装置的平面布置

Fig.3 Layout of filling sand model and observation instruments

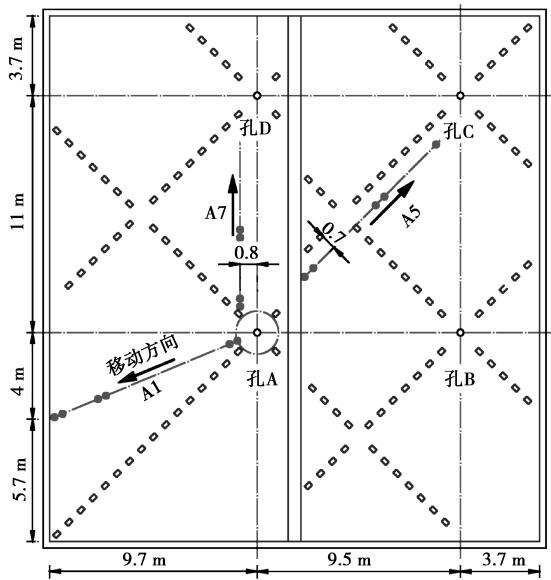
灌砂无损检测的测线布设原则:①避免外界振动干扰;②削弱边界效应;③有利于现场试验操作。

从距各灌砂孔孔心 1 m 处开始,测线以 22.5° 等角分布并向外辐射,每条测线中检波器位置按照 0.25 m 间距布置,激发偏移距为 0.25 m。

本文主要以灌砂孔 A 为例,介绍测线布置、检测过程及相应的检测结果。灌砂孔 A 的测线布置如图 4 所示。



(a) 灌砂前、灌砂后



(b) 灌砂过程中

图 4 测线布置图

Fig. 4 Layout of measuring line

1.4 试验检测过程及其步骤

在灌砂模型试验中,无损检测的数据采集分别在灌砂前、灌砂后以及灌砂过程中实施。其中,在灌砂前、灌砂后,采用冲击映像法和全波场无损检测法;在灌砂过程中,仅采用冲击映像法,且每次检测时间间隔约 1 h。冲击映像法使用单分量检波器(200 Hz),全波场无损检测法使用三分量检波器(200 Hz)。数据采集时,按逐条测线开展,力求有序、高效。具体检测步骤如下:

- (1)现场准备:检查测试仪器是否完好、齐全,并清理测试的场地。
- (2)数据采集系统:将地震仪、笔记本、电源以及连接线等依次连接好,确认各设备均处于正常工作状态;以确定的勘测点为基准点,检波器按每隔 0.25 m 布置一个,将检波器及底座用螺栓连接固定,平稳地置于混凝土试验平台上。
- (3)激发:沿移动方向的正向,使用 100 g 铁锤距离检波器 0.25 m 进行敲击。采用冲击映像法时,直接垂直敲击混凝土平台;采用全波场无损检测法时,将铁锭作为震源,敲击方向为与移动方向垂直,往复敲击两次。
- (4)采集信号:铁锤激励后,激发获得的信号被速度检波器接收,并通过大线传送给地震仪,地震仪记录完毕后,生成数据文件。文件生成后,进行下一次锤击,直至完成一整条测线。
- (5)数据记录:记录数据时,在记录用纸上写明检测时间,将测线号、测点位置、文件号的记录相对应;同时,通过对压力泵,观察窗等的实时观测,将灌砂方量、扩散半径等信息进行记录与整理。
- (6)数据分析:采用波形处理、能量处理及小波处理相结合的方式。

图 5 为试验检测现场。



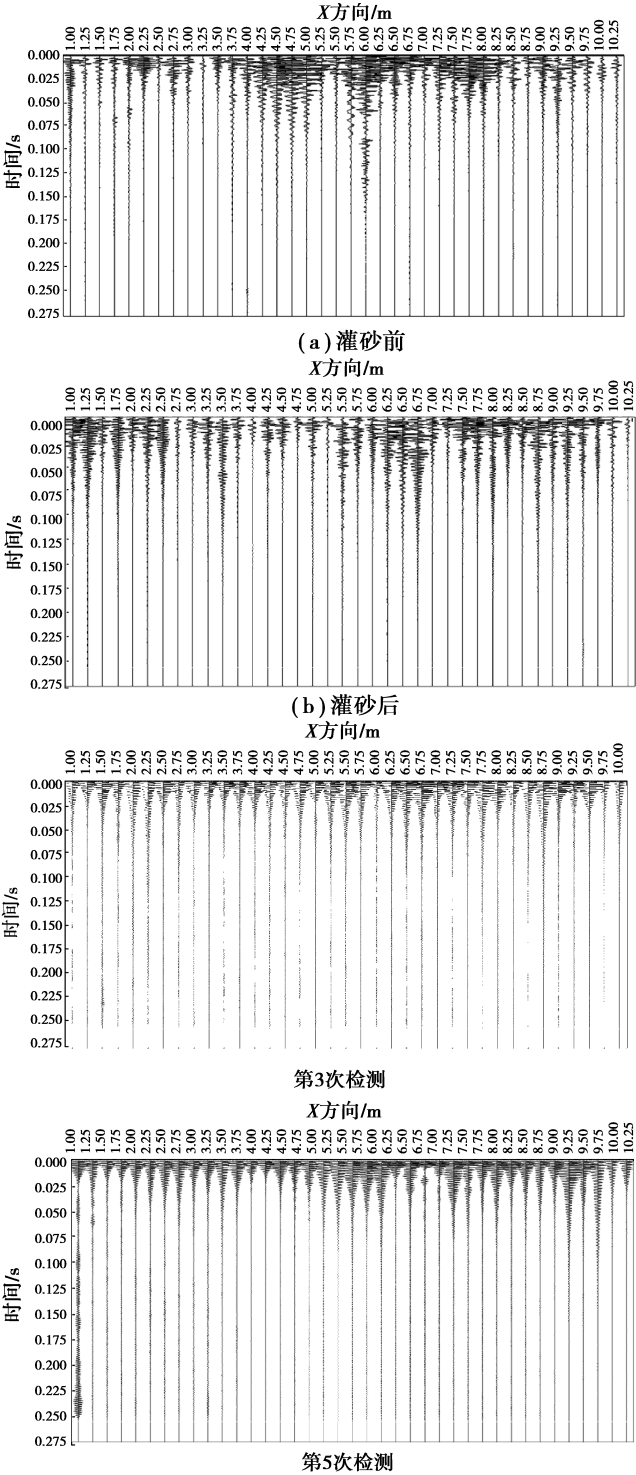
图 5 检测现场

Fig. 5 Detection test site

2 检测结果及分析

2.1 波形分析结果

对采集的数据进行预处理后,加入位置信息;对同一条测线的数据进行降噪、滤波等处理,将其按实际位置做成平面图,得到各测线的波形图。对比波形持续时间、振幅、丰度等变化判断灌砂效果,如图 6 所示。





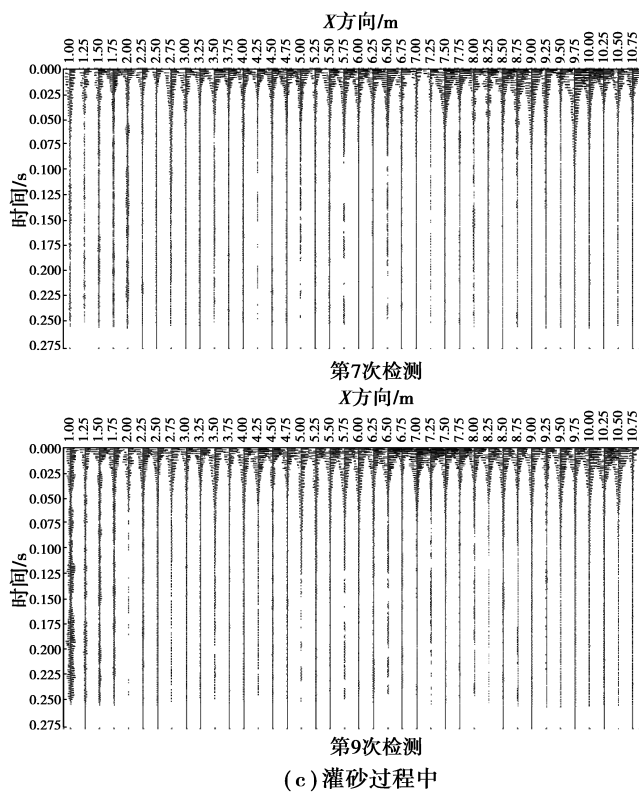


图6 波形分析

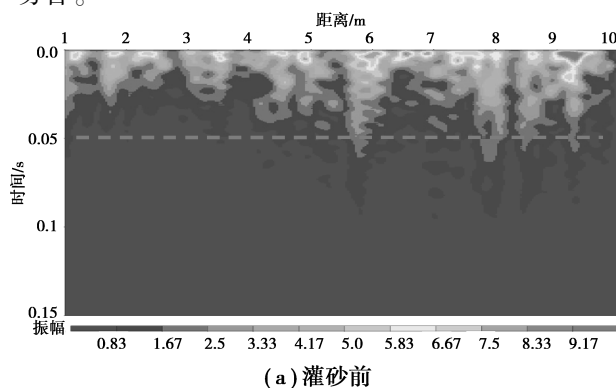
Fig. 6 Analysis of waveform

从图6可明显看出:在灌砂过程中,随着砂积盘的形成,各检测点的波形逐渐发生改变;灌砂后波形的持续时间减少,响应强度减弱。

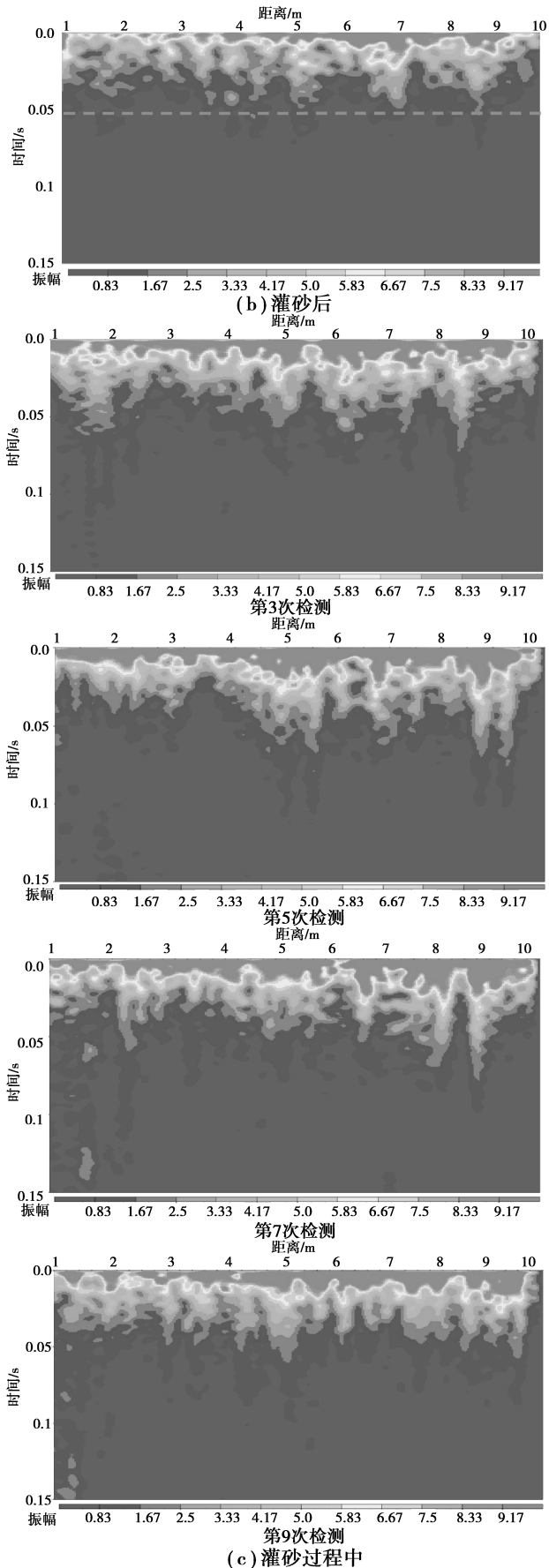
## 2.2 成像剖面分析结果

图7为冲击响应波形强度与持续时间随灌砂过程的变化。图中以测点位置为横轴,波动持续时间为纵轴,以颜色表示冲击响应波形的强度。

由图7可以看出,灌砂后呈现波形的持续时间减少、响应强度减弱等状况。图7(c)体现了灌砂过程中冲击响应波形随砂积盘的扩散而变化的状况,这与观测窗等所观测的结果较为吻合。



(a) 灌砂前



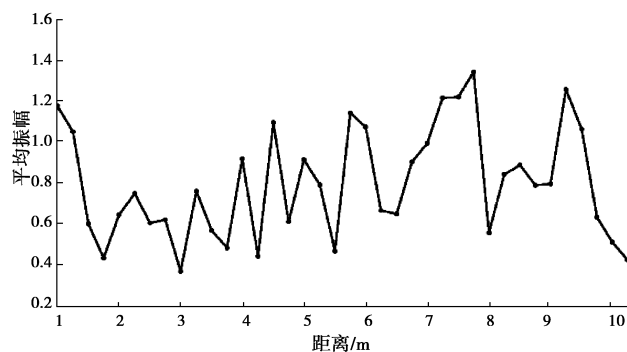
(c) 灌砂过程中

图7 波形成像剖面分析

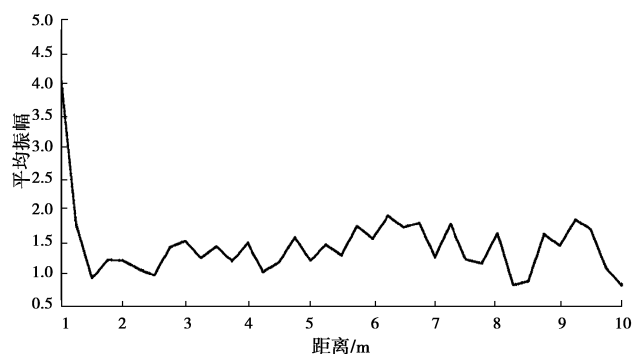
Fig. 7 Analysis of waveform imaging section

### 2.3 平均冲击响应强度的变化

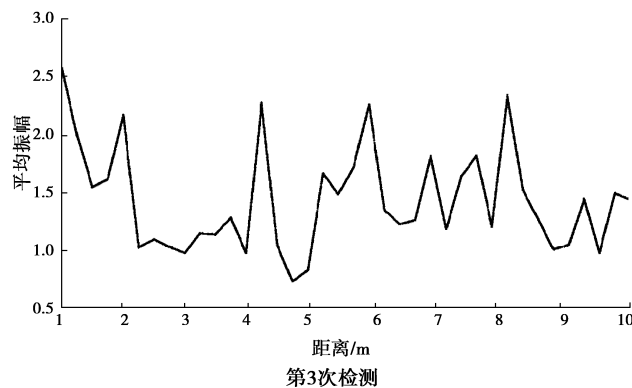
通过对每个测点的冲击响应强度随时间的变化在时间方向作平均,获得平均冲击响应强度曲线,如图 8 所示。



(a) 灌砂前



(b) 灌砂后



(c) 灌砂过程中

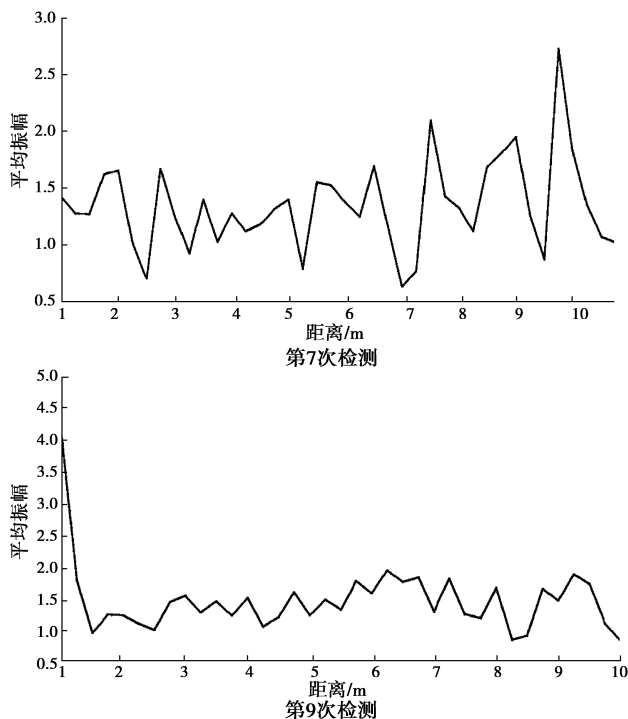


图 8 响应能量分析

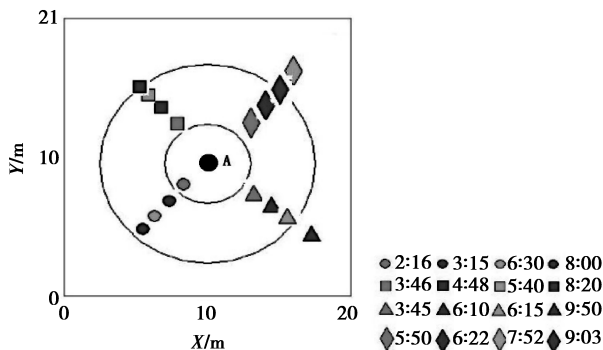
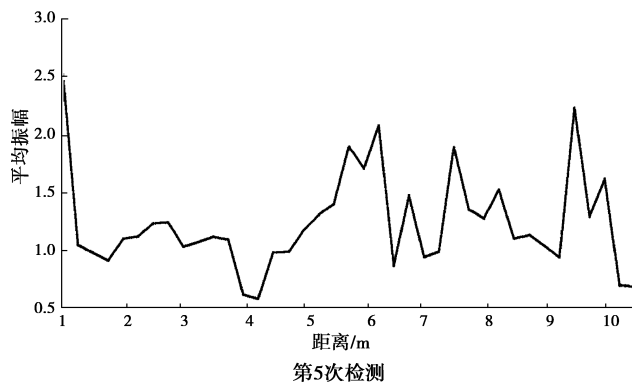
Fig. 8 Analysis of energy response

由图 8 可看出,随着灌砂的持续进行,平均冲击响应强度逐步减弱,这也与观测窗所观测的结果基本一致。

### 2.4 灌砂过程中砂积盘扩散状况

图 9 为 A 孔灌砂过程中冲击映像法的综合评价结果以及与观测窗所观测结果的比较。其中 2 个同心圆的半径分别为 3 m 和 7.5 m,图例表示灌砂持续时间及砂积盘大致扩散半径。

灌砂过程是个动态的变化过程,通过观测窗可以看到:随着灌砂量的增大,首先在 3 m 左右形成砂积盘,然后向 5 m 扩散,最后向外、向内进行填充,砂积盘扩散因模型边界及约束条件在不同方向扩散情况有所差异。图 9 表明,冲击映像法的检测结果与观测窗所获得的砂积盘扩散状况具有一致性。



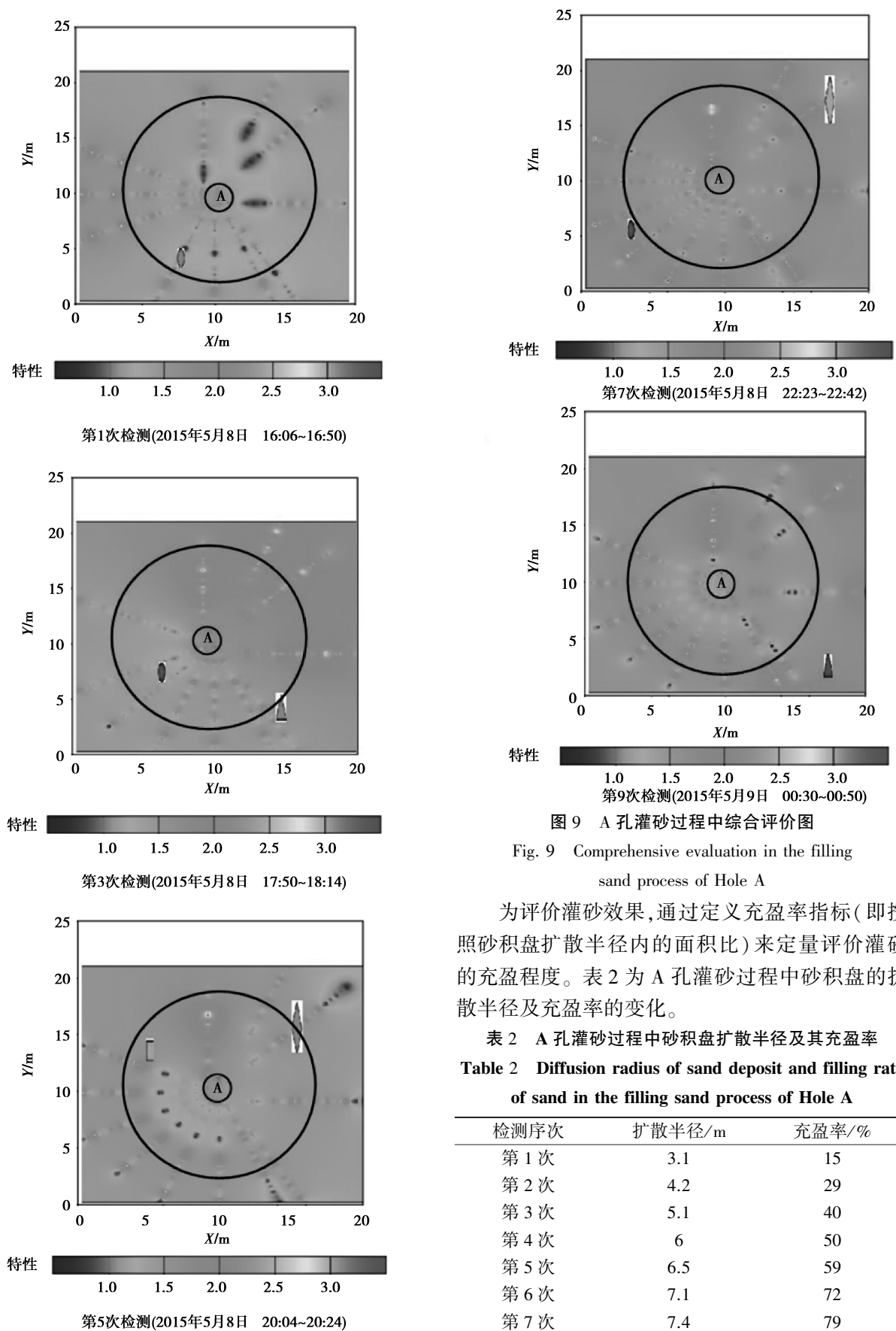


图 9 A 孔灌砂过程中综合评价图

Fig. 9 Comprehensive evaluation in the filling sand process of Hole A

为评价灌砂效果,通过定义充盈率指标(即按照砂积盘扩散半径内的面积比)来定量评价灌砂的充盈程度。表 2 为 A 孔灌砂过程中砂积盘的扩散半径及充盈率的变化。

表 2 A 孔灌砂过程中砂积盘扩散半径及其充盈率

Table 2 Diffusion radius of sand deposit and filling rate of sand in the filling sand process of Hole A

检测序次	扩散半径/m	充盈率/%
第 1 次	3.1	15
第 2 次	4.2	29
第 3 次	5.1	40
第 4 次	6	50
第 5 次	6.5	59
第 6 次	7.1	72
第 7 次	7.4	79
第 8 次	7.7	85
第 9 次	8.0	95

由表 2 可得知,随着灌砂时间的增加,扩散半径从 3~5 m 扩散,后随机性地大地扩散至 7.5 m 甚至更大,最终 A 孔的充盈率达到了 95% 以上。

2.5 灌砂效果的综合分析与评价

将每条测线的平均振幅、小波时频进行标准化响应值处理,加入位置信息,并展开在检测区域平面内,如图 10、图 11 所示。

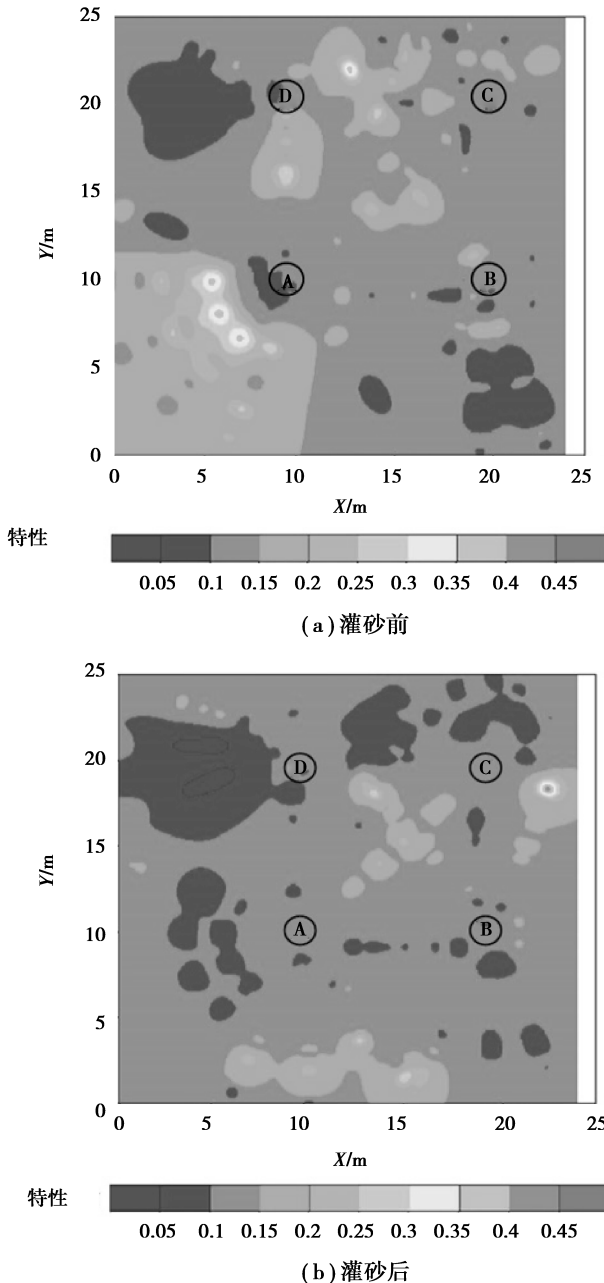


图 10 灌砂前后冲击响应能量分布图

Fig. 10 Scatter distribution of shock response before and after filling sand

图 10 为灌砂前后全波场检测结果,以灰白色系表示全波场响应能量大(不密实),深色、灰色系

表示全波场响应能量小(密实)。图 11 为综合评价结果,以灰白色系表示能量衰减率低(不密实),深色、灰色系表示能量衰减率高(密实)。

由图 10 可以看出灌砂后响应能量明显降低,根据冲击响应能量的变化,可评价灌砂效果。通过比较灌砂前后的响应能量,以响应能量的衰减倍率为参数,评价灌砂后的效果。

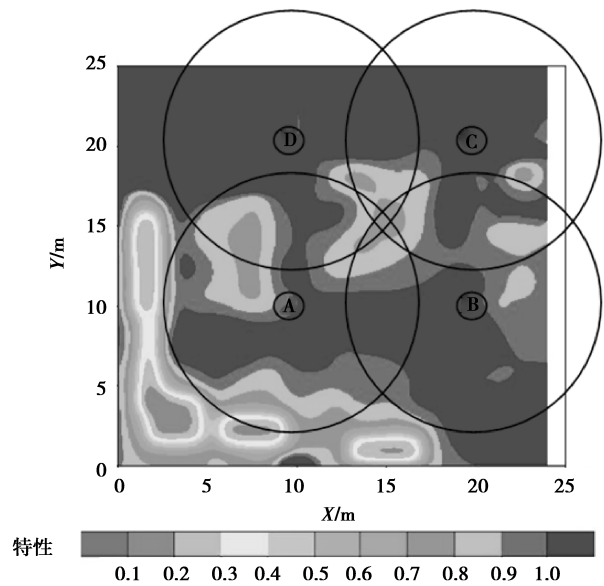


图 11 灌砂后综合评价图

Fig.11 Comprehensive evaluation chart after filling sand

由图 11 可以看出灌砂结束后整个灌砂区域的状况。灌砂孔 A 的左边和下部区域、灌砂孔 D 的右边和下部区域,冲击响应强度大,表明该区域灌砂效果欠佳,灌砂不够充盈;灌砂孔 B 邻近区域,冲击响应强度小,表明该区域灌砂效果好,灌砂充填密实,所形成的砂积盘与模型底面贴合;灌砂孔 C 邻近区域,冲击响应强度整体较小,但存在局部强度较大的区域,总体上可认为该区域灌砂效果较好。4 个孔的砂积盘扩散交界处均存在冲击响应能量较大的区域,可以认为这些区域的密实度比其他冲击响应能量较小的区域低。

3 结论

(1) 通过对等比例灌砂模型试验的现场检测,探讨了一种快速、简便、准确、经济的灌砂效果无损检测方法,有利于在沉管隧道基础灌砂施工监测中推广应用。

(2) 灌砂过程中可采用冲击映像法,利用波形



可视化、冲击响应能量及频谱变化相结合的分析方式,评价灌砂扩散半径及充盈度,对灌砂施工效果进行实时评价。

(3)采用冲击映像法、全波场无损检测法相结合的方式能够对灌砂施工过程及灌砂的充填效果进行综合检测及综合评价。应用该技术可掌控灌砂施工过程中砂盘的充填效果,确保结构和基底受力均匀,减少不均匀沉降。

(4)本项模型试验成果为南昌红谷隧道工程沉管基础灌砂施工与质量监控提供了技术支持,确保了灌砂施工的顺利实施及其工程质量;也可为其同类同工程提供参考与借鉴。

#### 参考文献(References)

- [1] 陈韶章,陈越.沉管隧道施工手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.(Chen Shaozhang, Chen Yue. The construction handbook of immersed tunnel[M]. Beijing:China Architecture & Building Press,2014. (in Chinese))
- [2] 杜朝伟,王秀英.水下隧道沉管法设计与施工关键技术[J].中国工程科学,2009,11(7):76-80.(Du Chaowei, Wang Xiuying. Key technology of design and construction on immersed tube tunnel[J]. Engineering Sciences,2009,11(7):76-80.(in Chinese))
- [3] 杨钢宇,郭铁栓,李金龙,等.超声地震模型试验在甬江隧道水底基础质量检测中的应用[J].地震学报,1996,18(4):518-522.(Yang Gangyu, Guo Tieshuan, Li Jinlong, et al. Ultrasonic seismic model test applied in underwater foundation quality detection of Yongjiang tunnel[J]. Acta Seismologica Sinica,1996,18(4):518-522.(in Chinese))
- [4] 沈永芳,黄醒春.沉管隧道注浆效果监测与评价的试验研究[J].地下空间与工程学报,2013,9(4):758-764.(Shen Yongfang, Huang Xingchun. Test study on monitoring and evaluation of grouting effect in the immersed tube tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2013,9(4):758-764.(in Chinese))
- [5] 李源,沈永芳,黄醒春.海底沉管隧道基础注浆扩散规律的试验研究[J].地下空间与工程学报,2012,8(6):1244-1249.(Li Yuan, Shen Yongfang, Huang Xingchun. Test study on diffusion laws of foundation grouting in submarine immersed tube tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012,8(6):1244-1249(in Chinese))
- [6] 车爱兰,黄醒春,郭强,等.利用表面波勘探检测沉管隧道压浆法的充填效果[J].上海交通大学学报,2011,45(5):648-652,658.(Che Ailan, Huang Xingchun, Guo Qiang, et al. Evaluation of mud-jack method filling effect of immersed tube tunnel using surface wave survey method [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45 (5): 648-652, 658. (in Chinese))
- [7] 冯少孔,黄涛,李海枫.大型预应力混凝土立墙内裂缝检测与成因浅析[J].上海交通大学学报,2015,49(7):977-982.(Feng Shaokong, Huang Tao, Li Haifeng. Evaluation and cause analysis of internal cracks for large scale 2-directional pre-stressed concrete walls[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2015, 49(7):977-982.(in Chinese))
- [8] 李邦旭,马永浪,刘上春.沉管隧道砂基础空洞无损检测方法研究[J].现代隧道技术,2016,53(1):17-22,27.(Li Bangxu, Ma Yonglang, Liu Shangchun. On nondestructive testing for cavities in immersed tunnel foundations by the sand-flow method [J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53 (1): 17-22, 27. (in Chinese))
- [9] 陈润.沉管隧道砂基础密实度无损检测方法研究[J].现代隧道技术,2016,53(3):131-136,156.(Chen Run. Nondestructive testing for the density of an immersed tunnel foundation by the sand-flow method[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53 (3):131-136,156.(in Chinese))
- [10] 郭俊,吴刚,沈永芳,等.南昌红谷隧道基础灌砂施工工艺的模型试验研究[J].现代隧道技术,2017,54(6):56-62.(Guo Jun, Wu Gang, Shen Yongfang, et al. Same-scale model test for the filling sand foundation construction technology of Nanchang Honggu immersed tunnel [J]. Modern Tunneling Technology, 2017, 54 (6):56-62.(in Chinese))