

# 钢壳混凝土管节组合结构注浆效果扫描成像评价方法研究

唐寅, 车爱兰

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 钢壳混凝土作为一种新型结构,其在防渗、结构抗震、质量控制等方面具有显著优势,已成功应用于大型沉管隧道等土木工程中。由于施工工艺以及材料性能等原因,施工时导致结构内存在不同程度的混凝土脱空现象,影响结构的强度、刚度和承载力等性能。针对钢壳混凝土组合结构注浆效果评价问题,基于弹性波在层状介质中的传播特性,结合钢壳混凝土组合结构的组合特征,提出一种扫描成像快速评价方法。首先详细描述了扫描成像方法的基本原理、采集工艺及成像方法,提出脱空厚度和连续脱空体积两个参数作为注浆效果的评价指标。针对脱空厚度的定量评价问题,开展了不同脱空厚度的模型试验,建立了脱空厚度与响应能量放大系数之间的关系。为验证方法在深中通道钢壳混凝土管节工程应用中的适应性、有效性,开展了模型试验。试验结果表明,脱空厚度大于0.50 cm的区域为检测区域的20%,脱空主要集中在构件处,最大的连续脱空体积达到1 042.5 cm<sup>3</sup>。可以认为,通常的注浆方式有可能导致组合构件处发生注浆不密实等问题。并通过预设缺陷等方式,验证该方法在注浆效果评价中的有效性。

**关键词:** 钢壳混凝土组合结构;响应能量;扫描三维成像;脱空厚度;连续脱空体积;注浆效果

**中图分类号:** TH212;TH213.3

**文献标志码:** A

**DOI:**10.13465/j.cnki.jvs.2019.21.021

## A scanning imaging evaluation method for grouting effect of a steel shell concrete tube joint structure

TANG Yin, CHE Ailan

(School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** As a new type structure, steel shell concrete has remarkable advantages in seepage prevention, seismic resistance, quality control and so on. It has been successfully applied in civil engineering, such as, large immersed tube tunnel. Due to causes of construction technology and material performance, there are different degrees of concrete filling-incompletion in construction to affect strength, stiffness and load-bearing capacity of a structure. Aiming at evaluation problems of grouting effect of steel shell concrete tube joint structure, based on propagation characteristics of elastic wave in layered medium, combined with characteristics of steel shell concrete tube joint structure, a scanning imaging rapid evaluation method was proposed. Firstly, the basic principle, acquisition process and imaging method for the scanning imaging method were described in detail to take two parameters including filling-incompletion thickness and continuous filling-incompletion volume as evaluation indexes for grouting effect. Aiming at the quantitative evaluation problem of filling-incompletion thickness, model tests for different filling-incompletion thickness were conducted to establish the relation between filling-incompletion thickness and response energy amplification coefficient. Model tests were conducted to verify the adaptability and effectiveness of the proposed method applied in Shenzhen-Zhongshan bridge steel shell concrete tube joint immersed tunnel project. The test results showed that the area with filling-incompletion thickness being greater than 0.50 cm occupies 20% of the detection area, and it is mainly concentrated at combined components; the maximum continuous filling-incompletion volume reaches 1 042.5 cm<sup>3</sup>; so, the usual grouting form is easy to cause problems of filling-incompletion at combined components; the effectiveness of the proposed method for evaluating grouting effect is verified through presetting defects.

**Key words:** steel shell concrete tube joint structure; response energy; scanning 3-D imaging; filling-incompletion thickness; continuous filling-incompletion volume; grouting effect

钢壳沉管隧道和混凝土沉管隧道分别起源于美国和欧洲。而日本在掌握这两种隧道施工方法的基础上又创造了钢壳混凝土组合结构的沉管隧道工法<sup>[1]</sup>。钢壳混凝土结构在防渗、结构抗震、质量控制等方面具有优势,并且由于能够实现工业化制造,近年来在我国部分重大工程项目中逐渐开始大规模应用。2017年,港珠澳大桥海底隧道的最终接头方案采用了钢壳混凝土结构,这是国内沉管隧道首次采用钢壳混凝土的案例。武汉杨泗港长江大桥2号桥墩采用沉井基础,其下部采用钢壳混凝土结构,高度达到28 m<sup>[2]</sup>。泰州大桥在基础方案的选择中,考虑受力、工序和经济等方面因素选用钢壳混凝土结构为沉井基础的下部结构。福建漳州双鱼岛陆岛连接桥成功将外包钢壳混凝土结构应用到索塔结构中,充分利用其减少模板,加快施工进度特点。综上,钢壳混凝土作为一种新的构形式,在大型工程项目中具有较好的应用前景。

然而在钢壳混凝土施工中面临的重大问题就是无法确保钢壳内的混凝土充分填充。在浇筑过程中一方面由于浇筑速度和混凝土下落高度等施工工艺的不规范。造成钢板与混凝土之间产生脱空。另一方面由于混凝土自身流动性不高,以及混凝土凝结收缩等原因,也会产生一定程度脱空,尤其在隔板及型钢等构件处,脱空现象尤为严重。这些脱空的存在使得周围的钢板在受力作用下容易出现变形,尤其在肋板等重要部位,引起构件的承载力显著下降<sup>[3-4]</sup>。此外,在沉管隧道中,一旦存在防水缺陷脱空处会与外界贯通,埋下钢材被腐蚀的隐患。因此为了保证工程的安全,需要寻求较好的检测手段来评价混凝土注浆效果,确定脱空的范围及厚度,为后期二次注浆提供依据,避免安全隐患。

由于混凝土表面覆盖有钢壳,无法利用常规的目测法或电磁法进行注浆效果检测,因此目前的检测技术主要有基于弹性波技术的声振法(声波)、冲击振动法和冲击映像法,以及基于射线的中子法等。声振法通过检测声谐振子各模式特性的变化判定缺陷是否存在及其位置等信息,但该方法却无法定量测出脱空的大小<sup>[5]</sup>。冲击振动法利用冲击荷载作用下的时域动力响应来探测病害的位置。但无法确定病害的大小,且在面对大范围检测时效率低<sup>[6]</sup>。冲击映像法是基于弹性波反射原理的无损检测方法,利用弹性波的近源波场,具有能量大,信号强等特点。但存在评价方法不一致,主观性强等问题<sup>[7]</sup>。中子法利用快中子慢化原理,通过探测快中子穿过钢板与混凝土之间脱空时产生的热中子分布异常现象,判断脱空范围和深度。但是该方法在针对内部钢结构复杂的情况尚不能进行缺陷判断,且不能满足工程上快速数据处理的要求<sup>[8]</sup>。对于

大体积钢壳混凝土组合结构注浆效果评价问题,目前的检测方法均存在主观性强、检测效率低、定量评价标准不明确等问题。

本文针对钢壳混凝土组合结构中注浆效果评价问题,基于弹性波在层状介质中的传播特性,考虑钢壳混凝土组合结构特点,提出一种三维阵列扫描成像方法。明确了该方法的基本原理、采集工艺、三维成像过程等。利用扫描成像方法对深中通道钢壳混凝土管节模型进行缺陷检测。现场实践表明,该方法能够实现扫描式快速数据采集,同时从三维空间角度实现对注浆效果准确评价。

## 1 基于组合结构特点的扫描成像方法

### 1.1 基本工作原理

将钢壳混凝土组合结构视为多层层状介质,介质中的某一层或多层的弹性参数发生变化时,弹性波场的传播特性亦发生变化。当给介质表面施加一个冲击力时,会在介质内部产生由纵波、横波、瑞雷波和勒普波组成的弹性波动场。根据弹性波的反射系数公式,如式(1),当弹性波在两层介质中传播时,反射波的反射系数由两种介质的波阻抗(波速与密度的乘积)差决定。两种介质材料的波阻抗相差越大,反射系数也越大,产生的反射波响应能量也就越强<sup>[9]</sup>。因此介质表面的弹性波场分布与介质内部的构造以及介质的物理性质密切相关。当介质内部结构发生变化,如内部存在裂缝或空洞,介质密度和波速都会降低<sup>[10]</sup>,形成反射界面,接收到的波形响应能量就会变强,当裂缝或空洞大小发生变化时,所接受的波形也会产生不一样的响应特征。因此从波形的响应能量变化就可判断介质内部是否存在缺陷,以及确定缺陷的大小。

$$R_{pp} = \frac{\rho_2 V_{p2} - \rho_1 V_{p1}}{\rho_2 V_{p2} + \rho_1 V_{p1}} R_{ss} = \frac{\rho_2 V_{s2} - \rho_1 V_{s1}}{\rho_2 V_{s2} + \rho_1 V_{s1}} \quad (1)$$

式中: $R_{pp}$ 为纵波反射系数; $R_{ss}$ 为横波反射系数; $\rho_1$ 、 $V_{p1}$ 、 $V_{s1}$ 分别为介质1的密度、纵波速度、横波速度; $\rho_2$ 、 $V_{p2}$ 、 $V_{s2}$ 分别为介质2的密度、纵波速度、横波速度。

### 1.2 钢壳混凝土组合结构特点

钢壳混凝土管节组合结构由钢壳结构和充填于钢壳结构中的混凝土组成。钢壳结构由内、外侧钢板组成,横向与纵向L型钢和扁钢焊接于钢板内侧,加强外壳强度及刚度。混凝土充填满壳体内部以提高管节结构的整体刚度和强度。结构要求混凝土能够完全紧密充填于钢壳内部,形成一体化结构,提高结构的整体性能<sup>[11]</sup>,如图1所示。

钢壳混凝土组合结构的特点在于,纵横排列的L型钢和扁钢将整个钢壳混凝土管节划分成多个相似的组合结构。各个组合结构由钢板、L型钢、扁钢和混凝

土组成,形成了三种不同的结构区域,如图1所示。区域1、2和3分别表示L型钢区域、扁钢区域和单一钢板区域。当在钢壳混凝土表面三种结构区域激发冲击力时,区域3可以认为是多层层状介质,区域1和区域2受构件的影响,弹性波场的传播特性非常复杂,在构件处会发生反射、折射、绕射等,导致三个区域的传播特征存在差异,如图2所示。因此,各个区域的波形响应亦会呈现不同的特征,需按照区域对采集的波形数据分别进行处理。

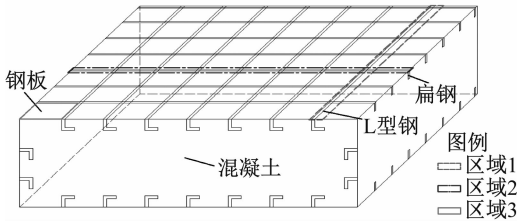


图1 组合结构示意图

Fig.1 Diagram of composite structure

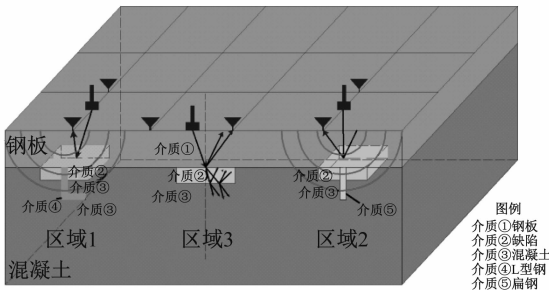


图2 组合结构中弹性波传播特性

Fig.2 Elastic wave propagation in composite structure

基于弹性波在复杂介质中的传播特性,并考虑钢壳混凝土组合结构的特点,提出一种基于组合结构特点的扫描成像系统。该系统特征在于能够分别采集三个区域的波形数据,自动识别对应的位置信息,实现不同区域波形数据的分类处理。同时利用各个组合结构性质相同的优势,实现数据的扫描式快速采集。

### 1.3 基于组合结构特点的扫描成像系统

图3为基于组合结构特点的扫描成像系统。将检测区域根据组合结构的大小和形状划分成多个扫描单元,如图4所示,每个组合结构相当于一个扫描单元。检波器网格化连接形成阵列式组合装置,阵列大小与扫描单元的大小相一致,设置为长 $a$ ,宽 $b$ ,检波器沿阵列长方向道间距设置为 $dx$ ,沿阵列宽方向道间距为 $dy$ 。激发锤由电动机控制沿垂直方向依次下落激发,每个激发点位置设置在两个相邻检波器的中心点,实现一次激发两个检波器同时接收,取两个检波器的平均值作为该激发点最终波形信息,并同时记录该波形所对应的位置信息。激发高度 $H$ 依据现场对激发能量的要求确定。完成一个单元数据的采集后,移动采集

系统依次扫描各个单元,并将各单元的采集数据拼接在一起,进而可以快速获取现场全部检测数据。

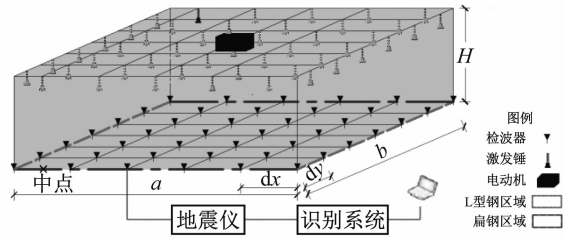


图3 基于组合结构特点的扫描成像系统

Fig.3 Scanning imaging system based on the characteristic of composite structure

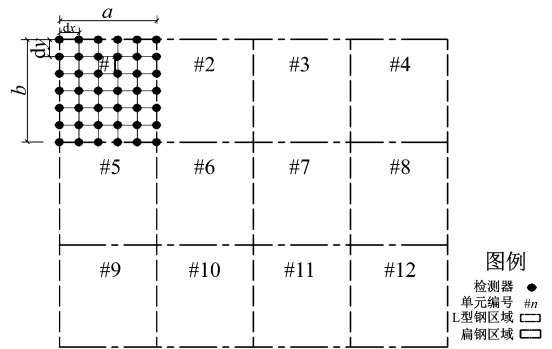


图4 扫描式数据采集

Fig.4 Scanning data collection

### 1.4 数据处理及三维成像方法

基于组合结构特点的扫描成像方法的特征在于能够分类处理三个区域的波形数据以及记录对应的位置信息,提高了数据处理的效率及结果的准确性。

#### 1.4.1 波形信息识别与处理

对采集的波形数据按照区域进行分类,对同一区域的波形数据进行降噪、滤波处理。

#### 1.4.2 响应能量放大系数分布

定义波形响应能量为波形振幅绝对值的平均值,对采集的所有波形数据进行响应能量分析,提取各点的响应能量值。为消除不同结构区域波形信息差异性,按区域对响应能量值进行处理,将每个测点响应能量值( $E_{ij}$ )除以对应区域内响应能量平均值( $E_a$ ),得到该点的响应能量放大系数  $M_{ij} = E_{ij}/E_a (i, j = 1, \dots, n)$ ,以各点的响应能量放大系数作为三个区域缺陷判断的统一标准。并根据记录的位置信息将放大系数在检测区域内展开,通过插值、平滑等处理后,得到二维的响应能量放大系数分布图。通过分布图可以观察缺陷的分布情况。

#### 1.4.3 建立脱空厚度与波形响应能量的关系

采用响应能量放大系数  $M_{ij}$  作为脱空厚度  $h_{ij}$  的评价指标。通过模型试验或数值模拟等方法确定脱空厚度与响应能量放大系数之间的函数关系。本文采用不同脱空厚度模型试验的方法,设计多个脱空工况,分析

脱空厚度与响应能量放大系数之间的相关性。

### 1.4.4 三维成像处理

根据脱空厚度与响应能量放大系数之间的函数关系,将二维的响应能量放大系数分布图转换成三维脱空厚度的空间分布图。通过三维可视化成像处理,基于组合结构特点的扫描成像方法可以直观的判断缺陷的分布及大小,并选取脱空厚度  $h_j$  以及检测区域内的连续脱空体积  $V_j$  两个参数,作为注浆效果的评价指标。

## 2 钢壳混凝土脱空模型中弹性波传播特性

为了研究弹性波在钢壳混凝土脱空模型中的传播特性以及获取脱空厚度与波形响应能量之间的关系,开展了小仓格模型试验。通过控制螺栓使混凝土表面与钢板之间存在不同的脱空情况,分析各脱空情况下检测区域的响应能量分布,得到脱空厚度与波形响应能量放大系数之间的定量关系。

### 2.1 模型试验概况

根据钢壳混凝土组合结构设计的要求,制作了小模型。试验模型长宽高分别为 2.1 m、2.1 m 及 0.5 m,除底面外,模型顶面及 4 个侧面采用相同的钢板厚度,均为 18 mm,底部钢壳厚度为 12 mm,注浆孔直径为 30 cm。模型四周设置螺栓,通过调节螺栓抬升钢板实现不同的脱空工况。考虑螺栓对数据采集的影响,试验选取模型中间 1.4 m × 1.6 m 区域为检测区域,如图 5 所示。考虑模型制作的方便,仅研究区域 2 的弹性波传播特性,即可作为三个区域缺陷定量评价的标准,因此未设置 L 型钢和扁钢。

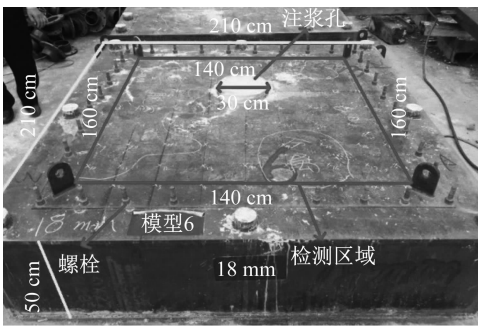


图 5 模型示意图

Fig. 5 Diagram of model experiment

为获取脱空厚度与波形响应能量之间的关系,共设计了 3 个模型试验工况进行试验。具体操作为旋转螺栓控制顶部钢板与混凝土上表面之间脱空厚度为 0、0.50 cm 和 1.00 cm,试验方案和参数设置如表 1 所示。

### 2.2 现场数据采集

数据采集系统由电瓶、外接计算机、数字地震仪、电缆、检波器、激发锤等组成,如图 6 所示。检波器为速度型检波器,固有频率 100 Hz,激发锤重量为 10 g。由于检测区域面积较小,且未设置 L 型钢和扁钢,因此

采用单点激发单点接收的方式进行数据采集。试验区域内以 10 cm 为间隔布设测点,共 255 个测点。

表 1 试验方案及参数设置

Tab. 1 Test scheme and parameter setting

工况	钢板厚度/mm	检测区域/cm	脱空厚度/cm	工况介绍
1	18	140 × 160	0	注水使完全密实,螺栓拧紧。
2	18	140 × 160	0.50	排水,钢板抬高 0.5 cm 后拧紧。
3	18	140 × 160	1.00	排水,钢板抬高 1.0 cm 后拧紧。



图 6 数据采集设备

Fig. 6 Data collection equipment

### 2.3 弹性波在脱空模型中的传播特性

在完成三个工况的全部数据采集后,对波形的响应能量进行了分析,图 7 为工况 1、2、3 的典型波形信息。可以看出,三个工况的波形形态基本一致,但是随着脱空厚度的增加,波形的振幅有了明显的变化,振幅呈现增大的趋势,充分说明脱空对波形响应能量具有放大效应。

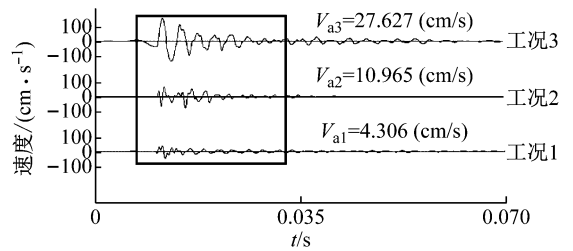


图 7 三个工况的波形例

Fig. 7 Waveform example of three cases

在对采集的所有测点波形进行响应能量分析后,计算出每个工况下检测区域内 255 个测点的波形响应能量平均值。并以工况 1 作为完全密实的状态,即响应能量放大系数  $M_1 = 1.00$ ,计算工况 2 的  $M_2 = 1.51$ ,工况 3 的  $M_3 = 2.69$ ,如下表 2。

### 2.4 脱空厚度与波形响应能量的相关性

随着脱空厚度的增加,响应能量放大系数也逐渐变大。将试验结果通过数据拟合,获得脱空厚度与响应能量放大系数之间的关系,如图 8 所示。

表2 模型试验结果

Tab.2 Model test results

工况	脱空度/cm	响应能量放大系数 $M_{ij}$
1	0	1.00
2	0.50	1.51
3	1.00	2.69

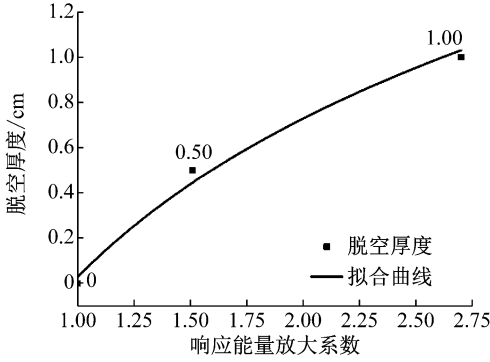


图8 脱空厚度与响应能量放大系数的函数关系

Fig.8 Function relationship between the thickness of filling-incompletion and the amplification coefficient of the response energy

同时根据曲线的变化趋势,运用对数函数关系,拟合出脱空厚度与响应能量放大系数之间的函数关系式,如式(2)

$$h_{ij} = \ln(1.04 \times M_{ij} - 0.02) \quad (2)$$

式中: $M_{ij}$ 表示响应能量放大系数; $h_{ij}$ 表示脱空厚度,单位 cm。

### 3 深中通道钢壳混凝土管节模型试验研究

针对深中通道沉管隧道工程,开展钢壳混凝土管节模型试验,旨在验证方法的实际检测效率,评价管节模型的注浆效果。

#### 3.1 深中通道钢壳混凝土管节模型概况

深中通道是世界级“隧-岛-桥-水下互通”集群工程,通道总长度为 6.8 km。其中特长双向八车道海底钢壳混凝土沉管隧道为世界首例,设计及施工难度大。每个标准管节的尺寸为 46 m × 10.6 m × 165 m,共 32 个管节,每个管节用钢量约 1 万吨。

为确保后期工程中钢壳混凝土管节混凝土注浆质量,开展了真实模型的混凝土注浆效果检测研究。比例尺模型以一定比例真实反映了钢壳混凝土管节的实际制作情况,模型长 9.0 m,高 7.0 m,上表面宽 10.1 m,下表面宽 15.8 m,如图 9 所示,立面设计图如图 10 所示。本次试验选取模型内侧底面区域作为研究对象,模型内侧底面区域大小为 3 m × 3 m,混凝土外侧钢板厚度为 30 mm,钢板内侧设置 L 型钢和扁钢,如图 11 所示。混凝土注浆口直径 20 cm,位于区域中心点左侧 30 cm 处,在检测区域的右上角预设缺陷,缺陷范围 60

cm × 60 cm。设置的缺陷脱空厚度范围在 0.50 cm ~ 1.00 cm。

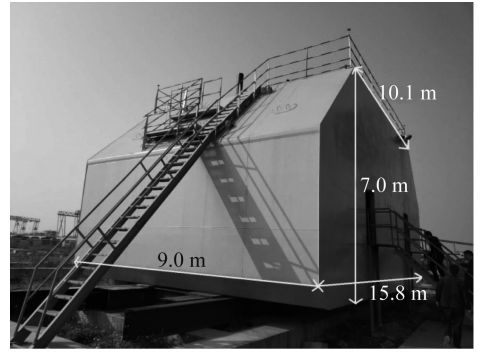


图9 钢壳混凝土管节模型

Fig.9 The model of steel and concrete composite immersed tunnel

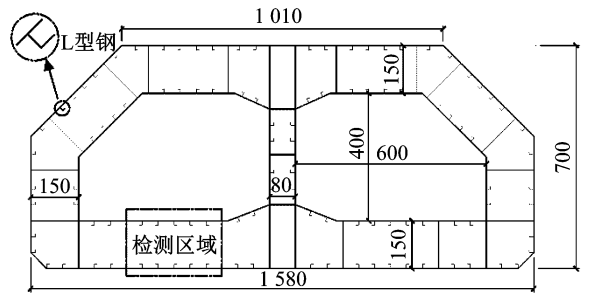


图10 模型立面设计图(cm)

Fig.10 The vertical design of the model(cm)

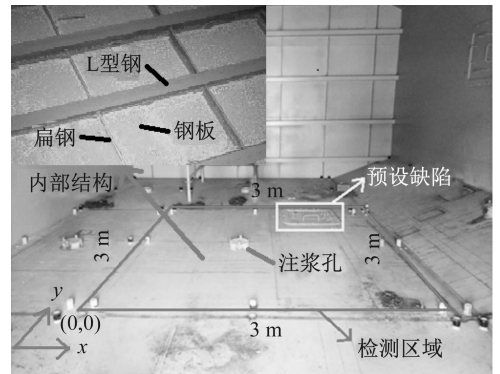


图11 模型内侧底面区域

Fig.11 Interior bottom area of the model

#### 3.2 现场数据采集

由于检测区域较大,且设置 L 型钢和扁钢,因此采用扫描成像系统进行数据采集。采集设备及参数与 2.2 节一致,根据检测区域底板加劲肋设计图,如图 12 所示。确定扫描单元大小为  $a = 50 \text{ cm}$ ,  $b = 60 \text{ cm}$ ,检波器间距  $dx = dy = 10 \text{ cm}$ 。所需检波器为 42 个,依据现场对激发能量的要求确定激发高度  $H = 15 \text{ cm}$ 。检测区域共划分为 30 个单元,移动采集系统依次扫描每个单元,完成全部区域的数据采集。

#### 3.3 三维成像处理

图 13 为检测区域的响应能量放大系数分布,可以看出在预设的缺陷处,响应能量呈现不同程度的放大

效应,检测结果与预设缺陷的范围有了较好的一致性。在沿 L 型钢及扁钢区域,响应能量放大系数较大,且出现大面积的连续放大现象,说明在该区域脱空现象尤为严重。

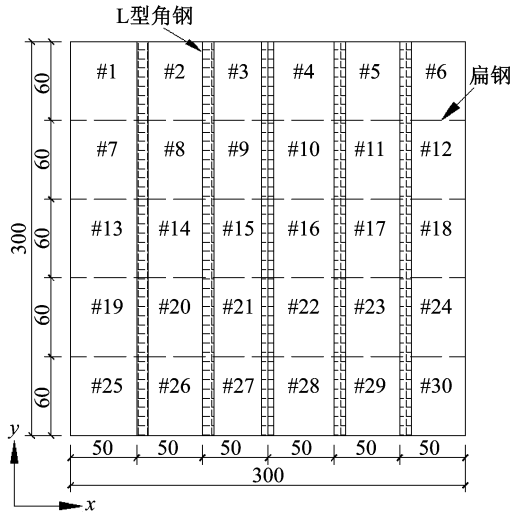


图 12 模型底板加劲肋设计图 (cm)

Fig. 12 The stiffener design of the model floor (cm)

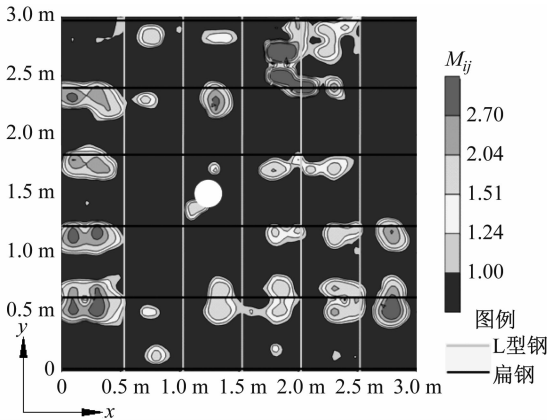


图 13 响应能量放大系数分布图

Fig. 13 Distribution diagram of the amplification coefficient of the response energy

根据模型试验得出的脱空厚度与响应能量放大系数之间的函数关系,实现检测区域脱空厚度的三维成像。如图 14 所示,深色区域表示为密实状态,其他区域颜色由浅变深依次表示脱空厚度的逐渐增大。从图中可以直观的看到缺陷的空间分布情况,脱空厚度小于 0.50 cm 的区域数量少、面积小,脱空厚度主要集中在 0.50 ~ 1.00 cm,局部区域脱空厚度大于 1.00 cm。脱空区域主要分布在构件处,存在连续贯通脱空区域。在预设缺陷的区域,三维成像结果显示该区域脱空厚度在 0.50 ~ 1.00 cm,与预设的脱空厚度基本吻合。

### 3.4 注浆效果评价

由三维成像处理结果可知,脱空厚度小于 0.50 cm 的区域离散性大,分布在非构件处,对结构性能影响

小。大于 0.50 cm 的区域呈现面积大、连续性强、且分布在构件处的特点,本文采用脱空厚度 0.50 cm 作为注浆效果评价指标。如图 15 表示除预设缺陷区域外其他区域不同脱空情况的面积占比,可以看出脱空厚度大于 0.50 cm 的区域达到检测区域的 20%,注浆效果欠佳。

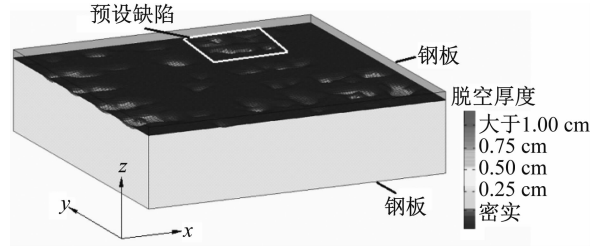


图 14 脱空厚度  $h_{ij}$  空间分布

Fig. 14 Space distribution of the thickness of filling-incompletion  $h_{ij}$

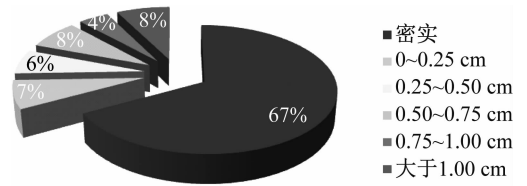


图 15 不同脱空厚度面积占比

Fig. 15 Area ratio of different thickness of filling-incompletion

连续脱空体积是指脱空区域的面积对脱空厚度积分而得到的数值。在脱空厚度评价的基础上,该指标充分考虑脱空的贯通性和连续性对结构的影响,能够进一步评价注浆效果。图 16 为统计的检测区域内连续脱空的分布情况。可以看出在检测区域内,非构件处的脱空较少,共统计出 6 个连续脱空区域,且脱空区域体积小,多集中在 25 ~ 200 cm<sup>3</sup>。而构件处的脱空较多,统计出 13 个连续脱空区域。这些区域存在体积大,连续性强特点,体积大多集中在 200 ~ 800 cm<sup>3</sup>,最大的连续脱空体积达到 1 042.5 cm<sup>3</sup>,严重影响组合构件的作用效果,造成结构整体强度和刚度的下降。因此在实际工程项目中,从工程安全角度考虑,针对钢壳混凝土组合结构注浆效果的检测是十分重要的,检测的脱空位置和厚度为后期二次注浆提供重要的参

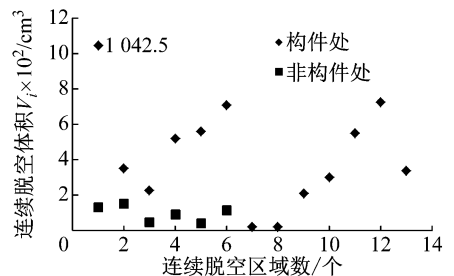


图 16 检测区域内连续脱空体积分布

Fig. 16 Distribution of continuous filling-incompletion volume in the detection area

考,保证了结构的安全。

## 4 结 论

(1) 基于弹性波在层状介质中的传播特性,并考虑钢壳混凝土组合结构的特点,提出一种扫描成像方法。明确了该方法的基本原理、采集工艺及三维成像方法,并提出脱空厚度以及检测区域内的连续脱空体积两个参数,作为注浆效果的评价指标。

(2) 针对成像方法中脱空厚度定量评价问题,开展了模型试验,设置三种不同的钢板抬升工况。通过数据拟合得到脱空厚度与响应能量放大系数之间的关系,实现了缺陷的定量评价。

(3) 针对深中通道沉管隧道工程,利用扫描成像方法,开展了钢壳混凝土管节模型注浆效果的检测。检测结果表明,钢壳混凝土组合结构受施工工艺以及混凝土自身性能等因素的影响,钢材与混凝土之间易产生不同程度的脱空缺陷,脱空厚度大于 0.50 cm 的区域达到检测区域的 20%。且缺陷主要分布在组合构件区域,构件处最大的连续脱空体积达到 1 042.5 cm<sup>3</sup>,导致结构强度、刚度和承载力下降,对工程造成安全隐患。通过预设缺陷,证明该方法可以快速评价钢壳混凝土管节的注浆效果。检测结果为二次注浆提供依据,保证了结构的安全。

### 参 考 文 献

- [1] LUNNISS R, BABER J. Immersed tunnels [M]. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [2] 郑大超, 朱斌. 武汉杨泗港长江大桥 2 号墩沉井施工关键技术[J]. 桥梁建设, 2017(6):106-110.  
ZHENG Dachao, ZHU Bin. Key techniques for construction of steel open caisson of pier No. 2 of Yangsigang Changjiang river bridge in Wuhan[J]. Bridge Construction, 2017(6): 106-110.
- [3] 叶勇, 李威, 陈锦阳. 考虑脱空的方钢管混凝土短柱轴压性能有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(增刊1): 324-329.  
YE Yong, LI Wei, CHEN Jinyang. FEA on compressive behavior of square CFST short columns with circumferential gap between concrete and tube [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(Sup1):324-329.
- [4] 叶勇, 韩林海, 陶忠. 脱空对圆钢管混凝土受剪性能的影响分析[J]. 工程力学, 2016, 33(b06): 62-66.  
YE Yong, HAN Linhai, TAO Zhong. Effects of gaps on the behaviour of circular CFST members under shear [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(b06): 62-66.
- [5] 彭永恒, 谭忆秋, 张肖宁, 等. 弹性地基接缝板声振法脱空判定[J]. 岩土力学, 2005, 26(12):1981-1986.  
PENG Yongheng, TAN Yiqiu, ZHANG Xiaoning. Void identification of jointed slab on elastic foundation by acoustic vibration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(12): 1981-1986.
- [6] 战家旺, 夏禾, 张楠, 等. 一种基于冲击振动响应分析的桥梁橡胶支座病害诊断方法[J]. 振动与冲击, 2013, 32(8):153-157.  
ZHAN Jiawang, XIA He, ZHANG Nan, et al. A diagnosis method for bridge rubber support disease based on impact responses[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(8):153-157.
- [7] CHE A, TANG Z, FENG S. An elastic-wave-based full-wavefield imaging method for investigating defects in a high-speed railway under-track structure [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 77: 299-308.
- [8] 裴少英, 涂善波, 高拴会. 蜗壳钢衬下混凝土脱空缺陷检测中中子无损探测法的应用[J]. 物探与化探, 2013, 37(2): 363-367.  
PEI Shaoying, TU Shanbo, GAO Shuanhui. The application of neutron non-destructive detection method to cavity defects detection of concrete under the spiral case steel liner [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2013, 37(2): 363-367.
- [9] 钟鹏飞, 车爱兰, 冯少孔, 等. 高速铁路线下结构典型病害分析及快速无损检测方法研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(11):154-160.  
ZHONG Pengfei, CHE Ailan, FENG Shaokong, et al. Typical defects' analysis and nondestructive detection method for undertrack structures of high speed railways [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(11):154-160.
- [10] 赵航, 李新平, 罗忆, 等. 裂隙岩体中弹性波传播特性试验及宏细观损伤本构模型研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(10):2939-2948.  
ZHAO Hang, LI Xiping, LUO Yi, et al. Characteristics of elastic wave propagation in jointed rock mass and development of constitutive model by coupling macroscopic and mesoscopic damage [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(10):2939-2948.
- [11] LENG Y B, SONG X B, WANG H L. Failure mechanism and shear strength of steel-concrete-steel sandwich deep beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 106:89-98.