

# 基于三维空间路径追踪的混凝土基桩层析成像技术研究

叶启扬<sup>1</sup> 吴君涛<sup>1</sup> 易恩泽<sup>1</sup> 王奎华<sup>1</sup> 张智卿<sup>2</sup> 汤旅军<sup>3</sup>

1. 浙江大学, 浙江杭州 310058
2. 温州理工学院, 浙江温州 325035
3. 浙江水利水电学院, 浙江杭州 310018

**摘要:** 该文针对传统基桩声波透射法检测的局限以及三维层析成像技术的不足, 提出一种基于三维空间路径追踪的基桩超声波层析成像优化算法。通过优化空间场源点分布, 利用 Dijkstra 算法在三维空间内精确追踪弹性波传播路径, 并结合改进 SIRT 算法, 实现对混凝土基桩内部结构的可视化以及潜在缺陷的快速定位与量化评估。随后, 通过有限元分析软件 ABAQUS 开展数值模拟验证, 并分析关键技术参数包括换能器布置密度、场源点加密系数及缺陷特征等对三维层析成像结果的影响。最后, 将所提出优化算法应用于浙江省杭州市钱塘江某大桥桩基础实际工程测试案例, 结果表明该技术能够准确定位混凝土缺陷位置并提供缺陷类型及程度参考, 有望为基桩超声波透射法检测技术创新提供理论基础和技术支持。

**关键词:** 桩基检测; 混凝土基桩; 层析成像; 三维空间路径追踪; 超声波透射

**中图分类号:** TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2026)01-0076-12

**DOI:** 10.15951/j.tmgexb.24070537

## Study on tomography technology for reinforced concrete piles based on three-dimensional path tracking

Ye Qiyang<sup>1</sup> Wu Juntao<sup>1</sup> Yi Enze<sup>1</sup> Wang Kuihua<sup>1</sup> Zhang Zhiqing<sup>2</sup> Tang Lujun<sup>3</sup>

1. Zhejiang University, Hangzhou 310058, China
2. Wenzhou University of Technology, Wenzhou 325035, China
3. Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China

**Abstract:** An optimization algorithm for ultrasonic tomography of foundation pile based on three-dimensional space path tracking is addressed in this paper. This algorithm can overcome the limitations of 3D tomography technology and traditional sonic logging techniques for piles testing and the shortcomings. By optimizing the distribution of spatial field source points, the Dijkstra algorithm is used to accurately track the elastic wave propagation path in three-dimensional space. And combined with the improved SIRT algorithm, the visualization of the internal structure of concrete foundation piles and the rapid location and quantitative assessment of potential defects are achieved. Subsequently, numerical simulation verification was carried out through the finite element analysis software ABAQUS. The impact of key technical parameters including transducer arrangement density, field source point encryption coefficient and defect characteristics on the three-dimensional tomography results was analyzed. Finally, the proposed optimization algorithm was applied to a bridge pile foundation on the Qiantang River in Hangzhou City, Zhejiang Province. The results demonstrate that the technology can accurately locate concrete defects and provide

**基金项目:** 浙江省自然科学基金探索项目(LTGG24E080001)、国家自然科学基金(52108349, 52178358, 52178367)

**作者简介:** 叶启扬, 硕士研究生 **通信作者:** 吴君涛, 博士, 研究员 **收稿日期:** 2024-07-12

references for defect types and severity, offering theoretical and technical support for innovations in sonic logging methods for piles testing.

**Keywords:** pile foundation detection; reinforced concrete piles; tomography; three-dimensional path tracking; ultrasonic transmission

**E-mail:** qiyangy0926@163.com

## 0 引 言

桩基础作为建筑物结构的重要组成部分,其质量对于整个工程的安全与稳定性具有决定性影响<sup>[1-2]</sup>。在现有的桩基检测技术中,低应变反射波法<sup>[3-4]</sup>、声波透射波法<sup>[5-6]</sup>以及钻芯法<sup>[7-8]</sup>等传统方法已经得到了广泛应用,但它们仍存在一些固有的技术局限。例如,低应变反射波法主要依靠基桩顶部的振动响应来判断基桩完整性,属于定性分析,难以精确定位桩身内部的缺陷并量化其缺陷程度<sup>[9-10]</sup>;钻芯法属于破坏性检测手段,其不仅成本较高,而且可能会对基桩造成质量损伤<sup>[11-12]</sup>;超声波透射法检测技术作为一种非破坏性检测手段,能够通过超声波在混凝土中的传播特性来反映桩基内部的缺陷情况,但是目前该检测技术仅针对各声测管间剖面进行分析,属于二维平面简化,与超声波在三维空间中的实际传播路径不符,且对基桩内部缺陷缺乏真实形态展示<sup>[13-14]</sup>。

近年来,随着计算机科学与信号处理技术的巨大进步,超声波层析成像技术顺势发展。该技术在传统超声波透射法检测技术基础上,通过增加收发换能器数目并利用计算机正反演算法,根据不同换能器间超声波走时来重构介质内部的声学参数分布,从而实现对基桩内部结构和潜在缺陷的直观展示。已有许多学者先后在这一领域开展了研究,张杰等<sup>[15]</sup>对智能化桩基超声波 CT 检测进行了系统的研究;张建中等<sup>[16-17]</sup>针对最短路径射线追踪方法做出了改进;王奎华等<sup>[18]</sup>针对基桩声测管倾斜导致混凝土速度计算误差问题,提出了一发三收式声波透射检测技术;王珂等<sup>[19]</sup>针对基桩声波透射法检测特征,提出了基于波源点追踪的优化反演算法,并对二维超声波层析成像技术进行了探讨;于喆等<sup>[20]</sup>基于改进克里金插值法,对基桩缺陷的空间插值问题进行了研究。然而,既有研究大多仍集中于二维或平面层析成像技术上,并且研究中往往将混凝土波速/慢度信息集成于网格单元上<sup>[21-22]</sup>,这不利于推广到实际工程测试中声测管布置不规则的情况;同时也未

能考虑超声波在三维空间中的复杂传播路径,进而限制了层析成像技术在实际工程中的应用。

鉴于此,本文拟提出一种基于弹性波三维空间路径检索的超声波层析成像技术,并将混凝土声速信息集成于空间节点,其可适用于随机布置不同数目及位置声测管的混凝土基桩(如下图 1),具有布点灵活,适用范围广的特点。随后,通过有限元分析软件 ABAQUS 对换能器发射、接收超声波信号进行数值模拟<sup>[23]</sup>,以验证所提出优化算法的可行性,并对控制成像效果的关键技术参数进行分析。最后,将该技术应用于实际工程案例,研究该层析成像技术在真实工况中的合理性和适用性。本文所提出的方法能够快速追踪超声波的空间传播路径,并实现对基桩内部三维空间介质特性分布的精确反演计算,有利于基桩超声波层析成像技术的进一步推广应用。

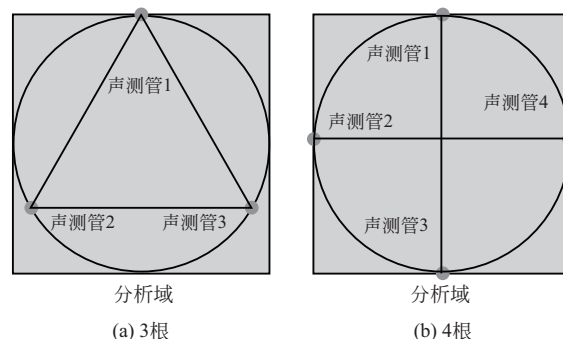


图 1 基桩布置声测管数

Fig. 1 Number of acoustic detection tubes arranged inside the foundation pile

## 1 三维波源追踪与路径检索模型

在基桩三维空间范围内,采用立方体单元网格离散方法,将分析区域划分为若干三维网格单元,将每个网格单元顶点定义为超声波传播源点,其中每个波源点都集成有其邻近区域混凝土介质的波速/慢度信息。同时,定义每个波源点仅与相邻波源点进行弹性波传播,其传播走时可以由两点间距与它们的平均波速计算确定。

### 1.1 三维空间场源点布置

针对基桩三维空间中声测管和换能器的布置方案,引入声测管间剖面水平/竖向尺寸比 $\alpha_l$ 和竖向方向加密系数 $\beta_v$ 以实现场源点布置。如图2所示(以布置4根声测管的混凝土基桩为例),基桩内部两对声测管在水平方向上的测管间距为 $L_h$ ,分析域内竖向深度差值为 $L_v$ ,换能器组竖向布置间距为 $\Delta H$ ,定义水平/竖向尺寸比 $\alpha_l$ 和加密系数 $\beta_v$ ,有:

$$\alpha_l = L_v / L_h \quad (1)$$

$$\beta_v = \lceil L_v / \mu \rceil \quad (2)$$

式中:符号 $\lceil \cdot \rceil$ 为取整函数; $\mu$ 为成像分辨率。

考虑弹性波三维空间传播的复杂性,分别计算水平横向、纵向和深度方向上的网格节点布种数( $n_{h1}$ ,  $n_{h2}$ ,  $n_v$ ),并确保网格划分在三个维度上的均匀性和适应性。

$$n_v = \frac{L_v}{\Delta H} \cdot \beta_v + 1 \quad (3)$$

$$n_{h1} = \lceil \frac{L_v}{\Delta H \cdot \alpha_l} \cdot \beta_v \rceil + 1 \quad (4)$$

$$n_{h2} = \lceil \frac{L_v}{\Delta H \cdot \alpha_l} \cdot \beta_v \rceil + 1 \quad (5)$$

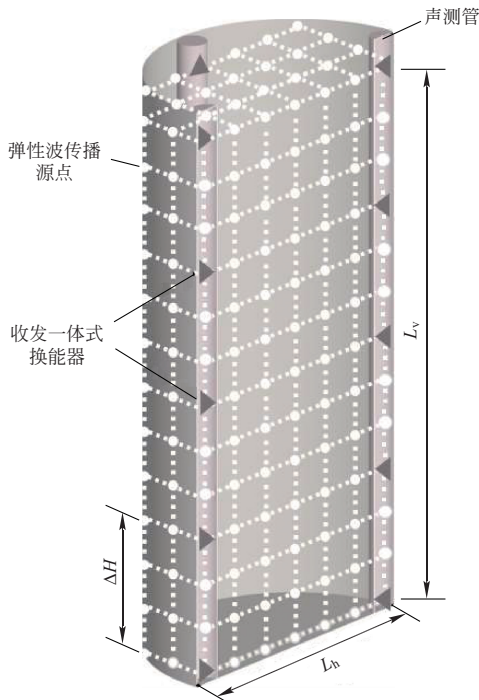


图2 三维空间下基于换能器布置方案的场源点分布示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of field source point distribution based on transducer layout in three-dimensional space

### 1.2 波源点间传播历时关系

为了实现三维空间下弹性波传播最短历时路径搜索,根据波源点间的位置关系,定义不同波源点间的

传播历时关系。在三维空间弹性波传播模型中,每个波源点仅与相邻波源点进行弹性波传播,而与远处波源点传播历时设置为无穷大。该假设可以简化计算过程,同时保持了对弹性波空间传播特性的准确描述。

图3展示了波源点分别位于分析域内部、边缘和角部与空间26节点次级源点的位置关系示意图,这些节点代表了波源点在三维空间中可能的波传播路径。这种表示方法不仅直观地展示了波源点间的传播关系,而且为后续的路径优化和最短路径搜索提供了理论基础。

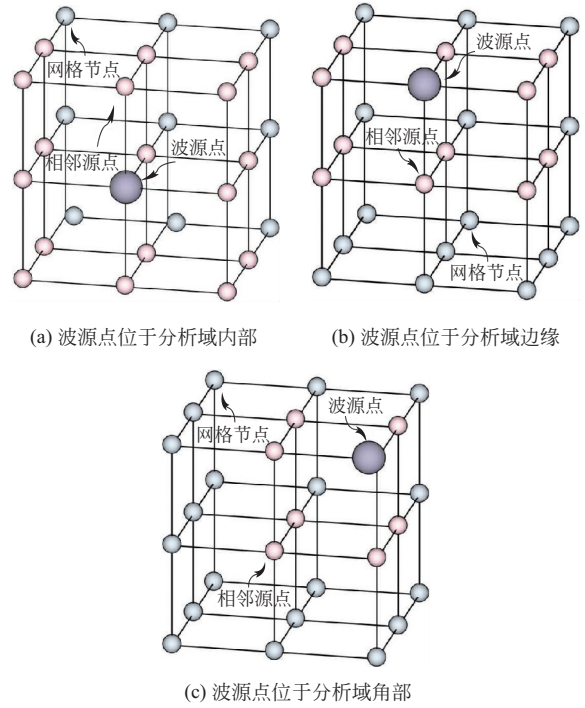


图3 波源点与相邻次级源点位置关系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the positional relationship between the wave source point and adjacent secondary source points

### 1.3 三维最短历时路径搜索

在三维超声波传播分析域内,为了精确追踪三维扫略弹性波的真实传播路径,采用Dijkstra最短路径搜索算法进行定位,其具体步骤包括:

#### (1) 构建节点邻接关系矩阵

遍历整个网络,按26节点次级源点布置规则为每个节点确定其空间邻近节点,同时构建一个节点邻接关系矩阵,该矩阵能够存储每个节点及其相邻节点的信息。

#### (2) Dijkstra 算法实现

Dijkstra 算法通过一个集合来记录从起始节点到每个节点的当前已知最短历时,并采用一个优先级排序的数据结构来始终选择当前已知历时最短的节点进行扩展。在每次迭代中,算法遍历每个节点的

所有邻近节点，并更新到这些邻近节点的潜在最短历时。通过不断迭代，逐步构建出从起始节点到目标节点的最短历时路径。

## 2 基于空间场修正的优化反演算法

基于已知三维空间下弹性波传播最短历时路径，可以根据实际弹性波走时对路径经过节点进行波速/慢度信息修正。在混凝土超声波层析成像技术的研究与应用中，联合迭代重建技术(SIRT)因其能够逐步改善重建图像的质量而得到广泛应用<sup>[24-27]</sup>。然而，传统SIRT算法在实际应用中可能会遇到收敛速度缓慢或易于陷入局部最优解的问题。此外，该算法仅针对射线路径上的节点慢度值进行调整，这可能不足以反映周围空间介质的真实特性，从而限制其在复杂介质特性反演中的准确性和可靠性。

为解决上述局限，本研究提出了一种基于空间场修正的改进SIRT算法，该算法在原有SIRT算法的基础上，引入了griddata插值函数<sup>[28]</sup>，以实现分析域内所有节点慢度信息的综合修正。这种改进旨在同步提升反演过程的收敛速度与重建图像的精度，具体迭代步骤如下所述：

(1) 在第 $k$ 次迭代过程中，将三维空间中的介质慢度场定义 $s^k$ ，其中 $s_j^k$ 表示第 $j$ 个节点处集成的近场介质慢度，初始慢度场被记作 $s^0$ 。

(2) 针对第 $i$ 条射线，其传播时间预测值为 $t_i^{-k} = \sum_{j=1}^J a_{ij} s_j^k$ ，其中 $a_{ij}$ 表示第 $i$ 条射线经过第 $j$ 个节点的射线长度，其值等于经过第 $j$ 个节点前、后波源点之间距离和的一半。

(3) 对于射线经过的每个节点，基于估计传播时间与实际测量传播时间之间的偏差，对第 $j$ 个节点处慢度进行修正：

$$s_j^{k+1} = s_j^k + \mu \frac{\sum_{i=1}^I a_{ij} \left[ (t_i - \bar{t}_i^k) / \sum_{j=1}^J a_{ij} \right]}{\sum_{i=1}^I a_{ij}} \quad (6)$$

式中： $0 < \mu < 1$ 为松弛参数，旨在提升计算的稳定性。

(4) 根据上一步中场内各节点处非零慢度修正值，通过griddata插值函数对完整超声波扫略场内节点慢度进行修正：

$$s_j^{k+1} = \text{griddata}(\text{points}, \text{values}, M, \text{method}) \quad (4)$$

式中：points和values为射线经过点的坐标和修正慢度； $M$ 为需要插值的三维空间，method可以根据实际需求选择适当的插值方法，如线性、最近邻、三

次插值等。

重复迭代步骤1至4，直至满足预设收敛标准。通过在迭代过程中引入griddata插值函数，不仅优化了局部节点的慢度修正，还实现了对整个三维扫略场的全局慢度估计，显著提高了反演算法在处理复杂空间介质特性时的准确性和鲁棒性。

综上，基于三维空间路径追踪的混凝土基桩层析成像正演及反演计算流程如图4所示。

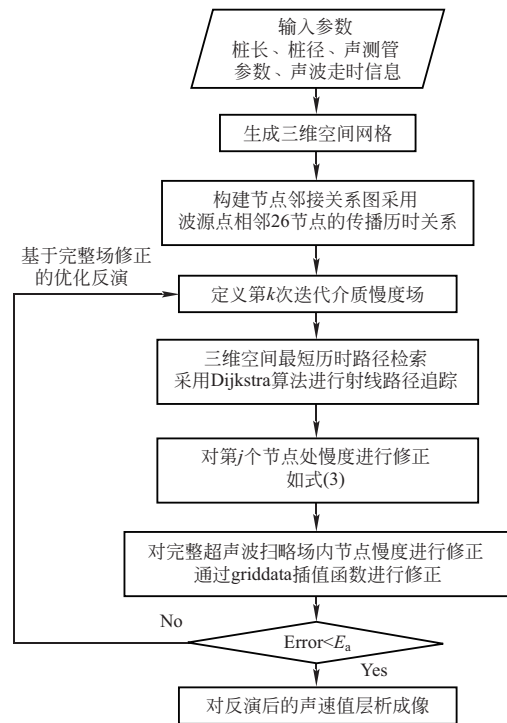


图4 三维空间路径追踪层析成像计算流程图

Fig. 4 Three-dimensional space path tracking tomography calculation flow chart

## 3 有限元模拟与参数分析

至此，可以通过本文上述的优化场源点分布的数学模型、空间三维最短历时路径搜索方法、优化反演算法等实现基桩超声波三维层析成像分析。由于数值模拟在理论验证、参数敏感性分析及算法优化方面的显著优势，本节将进一步利用有限元分析软件ABAQUS，展开基桩超声波三维层析成像技术的数值模拟，研究各项技术参数对三维层析成像效果的影响，并对所提出方法进行深入优化。

采用有限元分析软件ABAQUS模拟换能器在不同工况下发射和接收换能器信号。图5展示了基桩在存在内部缺陷时的剖面情况以及相应的数值模型。建模过程中，桩身内部混凝土缺陷被理想化为球状，

与桩身一同采用 C3D10 单元, 考虑低应变工况并通过动力显示求解器 (Dynamic, Explicit) 进行动态响应分析。为模拟超声波发射信号, 在发射换能器位置施加水平位移场, 并将超声波主频率设定为 40 kHz。同时, 考虑到超声波传播过程中的频散效应, 选用单周期窗函数对信号进行调制, 其表达式如下<sup>[29-30]</sup>:

$$f(t) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \cos\left(\frac{2\pi f_c t}{n}\right) \right] \cdot \sin(2\pi f_c t) \quad (7)$$

式中:  $n$  为单音频数;  $f_c$  为超声波主频率。

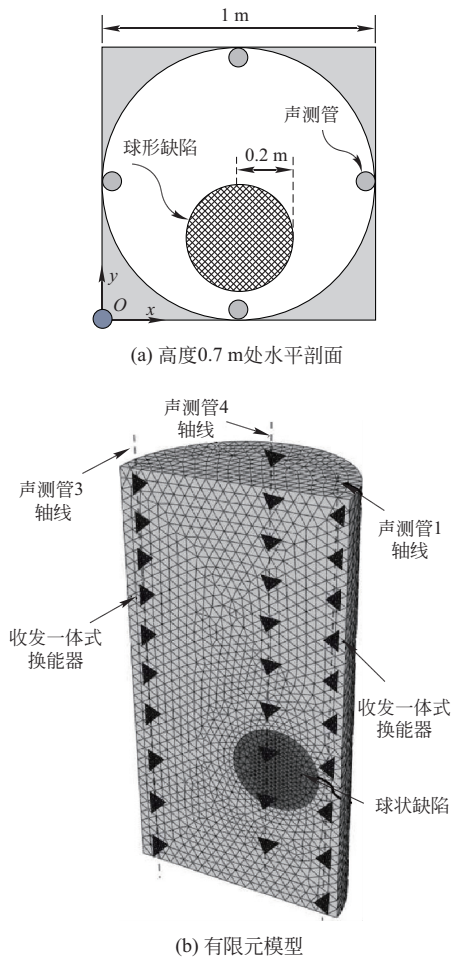


图5 基桩超声波检测

Fig. 5 Ultrasonic testing of foundation piles

取弹性波从发射换能器传播至接收换能器对应信号峰值的时间差作为弹性波走时。若无特殊说明, 取混凝土材料属性、缺陷材料属性、基桩及声测管尺寸、球状缺陷位置及尺寸参数如下:  $v_c = 4\ 000$  m/s;  $v_d = 3\ 200$  m/s;  $L_v = 2.00$  m;  $L_h = 1.00$  m;  $n_v = 10$ ;  $\beta_v = 1$ ;  $r_{x1} = 0.50$  m;  $r_{y1} = 0.30$  m;  $r_{z1} = 0.70$  m;  $r_{d1} = 0.20$  m。其中:  $v_c$ 、 $v_d$  分别为正常混凝土和缺陷混凝土中的弹性波速度;  $r_x$ 、 $r_y$ 、 $r_z$  分别为球状缺陷圆心在混凝土基桩内部的三维空间坐标位置;  $r_d$  为球状缺陷半径。

将有限元数值模拟不同工况条件下的换能器接收弹性波传播历时作为测试数据, 以下采用波源点相邻 26 节点的传播历时关系进行射线路径追踪, 反演得到基桩范围内三维空间介质波速/慢度分布, 并研究各项技术参数对层析成像效果的影响。

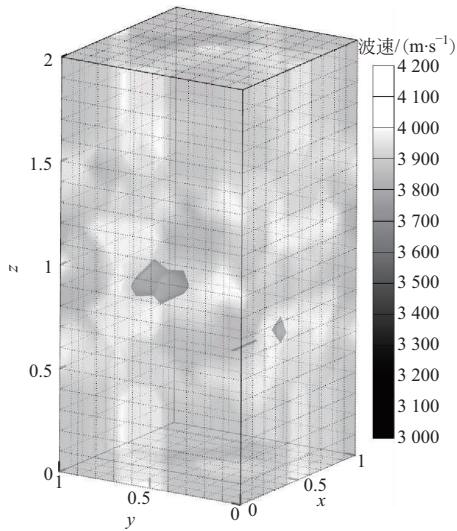
### 3.1 换能器布置密度影响

在工程实践中, 换能器的布置密度对超声波层析成像的精度具有显著影响。为了提升成像结果的可靠性, 本研究提出了一种基于潜在缺陷半径来确定换能器布置密度的方法。具体而言, 换能器的布置密度应根据缺陷的预期尺寸进行调整, 对于较小的缺陷, 为了获得足够的分辨率, 需要更小的换能器布置间距; 而对于尺寸较大的缺陷, 则可以采取相对稀疏的布置, 以降低换能器布置成本和计算代价。

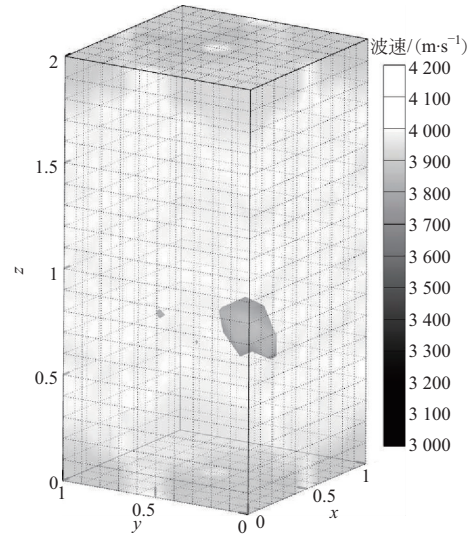
通过 ABAQUS 数值模拟, 验证了这一方法的有效性。图 6 研究了不同换能器布置密度对层析成像质量的影响。对比图 6(a)、图 6(b) 与图 6(c) 可以看到, 当检测区域范围不变时, 当换能器个数为 5 时 (如图 6(a) 所示), 其间距 (0.40 m) 与缺陷尺寸 (0.40 m) 较为接近, 此时层析成像效果较差, 对于缺陷的定位、尺寸及程度的评估均不准确; 作为对比, 当换能器个数增加至 10 个时 (如图 6(b) 所示), 其对缺陷的定位较为准确, 但是其对缺陷尺寸及程度的识别还存在一定的误差; 当换能器个数增加至 20 个时 (如图 6(c) 所示), 其对缺陷的定位、尺寸及程度的识别精确度均明显提升。通过不同换能器布置密度的对比分析, 发现当换能器间距约为缺陷半径的一半时, 可以获得较好的成像效果。这一发现可以为工程应用中的换能器布置提供一个实用的指导原则, 有助于提高检测效率和成像质量。

### 3.2 场源点加密系数影响

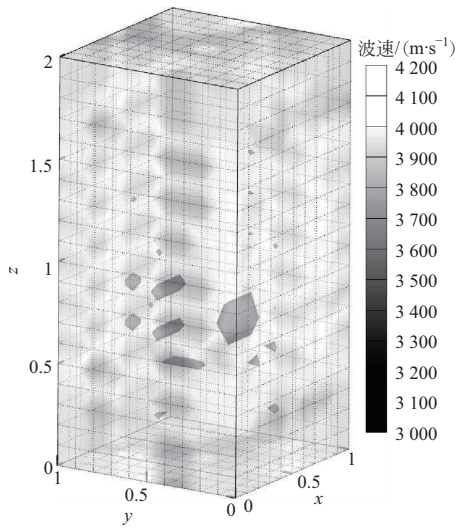
图 7 研究了场源点加密系数对层析成像质量的影响。由图 7(a) 可见, 仅按换能器间距进行场源点布置时 ( $\beta_e = 1$ ), 三维层析成像结果可以准确定位缺陷位置并反映缺陷较为真实的三维形态; 相比之下, 图 7(b) 虽然提高了场源点加密系数 ( $\beta_e = 2$ ), 但是并未带来成像质量的提升, 这一现象可能是由于实际检测射线数相较于场内源点总数远不足, 导致射线路径计算陷入局部最优解, 进而影响缺陷的准确定位及其成像效果。与二维成像的情况类似<sup>[19]</sup>, 在三维成像时, 场源点加密系数增长对于三维成像结果的误差会呈三次方级增长。因此, 对于本例而言, 采用适当的场源点加密系数 ( $\beta_e = 1$ ) 已经可以得到令人满意的结果, 以下讨论均采用  $n_v = 20$ ,  $\beta_v = 1$ 。



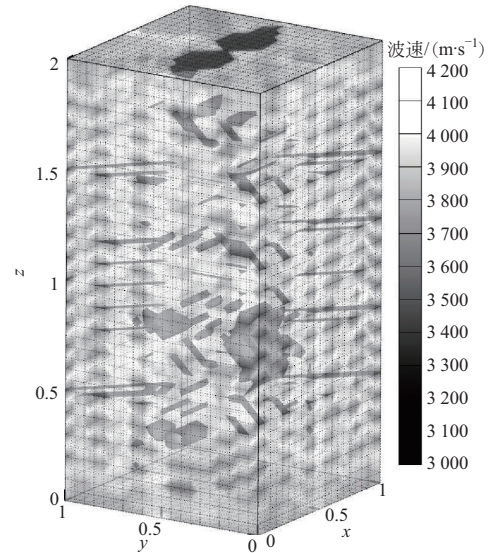
(a)  $n_v=5$



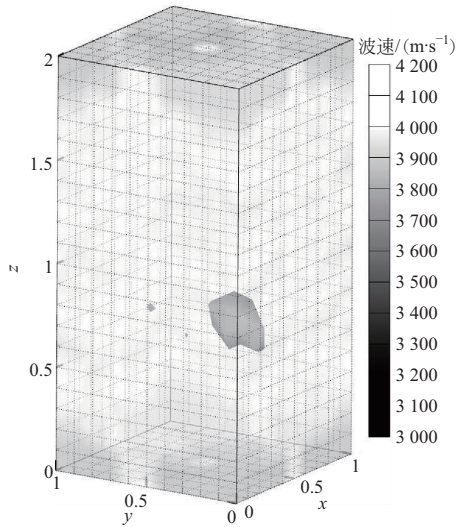
(a)  $\beta_v=1$



(b)  $n_v=10$



(b)  $\beta_v=2$



(c)  $n_v=20$

图6 当  $r_x=0.50$  m,  $r_y=0.30$  m,  $r_z=0.70$  m,  $r_d=0.20$  m 时, 换能器布置密度对成像效果的影响

Fig. 6 when  $r_x=0.50$  m,  $r_y=0.30$  m,  $r_z=0.70$  m,  $r_d=0.20$  m, Effect of transducer arrangement density on imaging

图7 当  $n_v=20$  时, 场源点加密系数对成像效果的影响

Fig. 7 when  $n_v=20$  Effect of the encryption coefficient of the field source point on imaging

### 3.3 缺陷数目及尺寸影响

图8研究了缺陷尺寸对层析成像效果的影响。如图8(b)~图8(d)所示, 当缺陷尺寸较大时(缺陷半径为0.20~0.40 m), 成像效果较好, 能够较为准确地反映缺陷的位置、尺寸及程度。如图8(a)所示, 当缺陷尺寸较小时(缺陷半径仅为0.10 m), 成像虽然能够大致定位缺陷位置, 但是由于精度不足不能反映缺陷的真实形态, 该成像误差主要是由于换能器间距(0.10 m)与缺陷半径(0.10 m)较为接近。

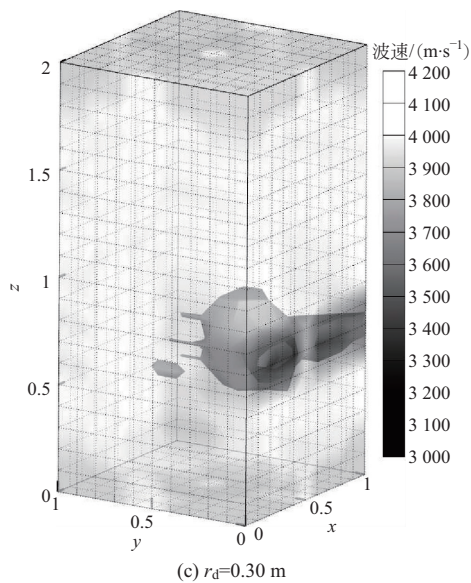
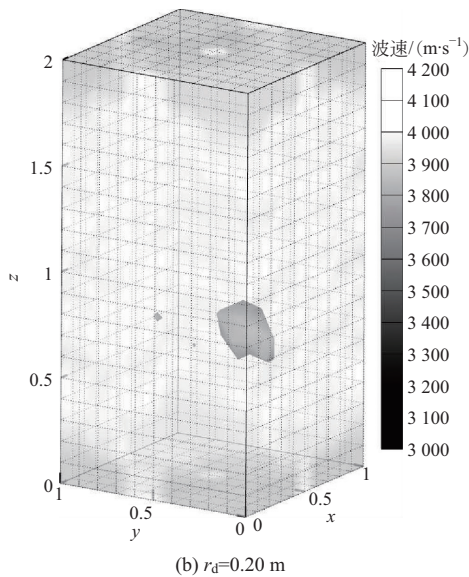
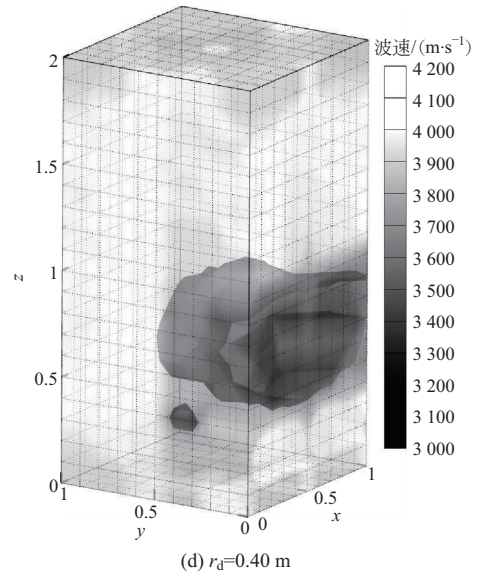
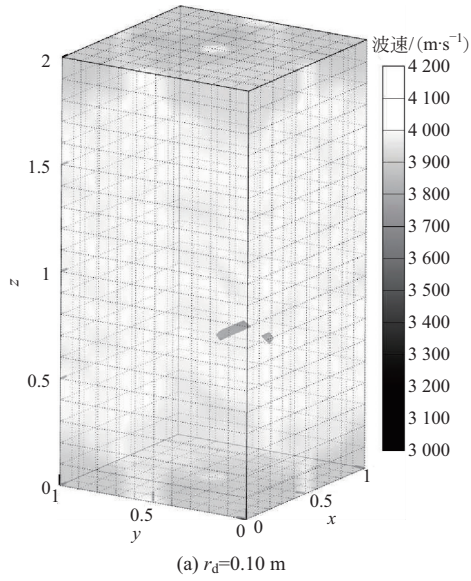
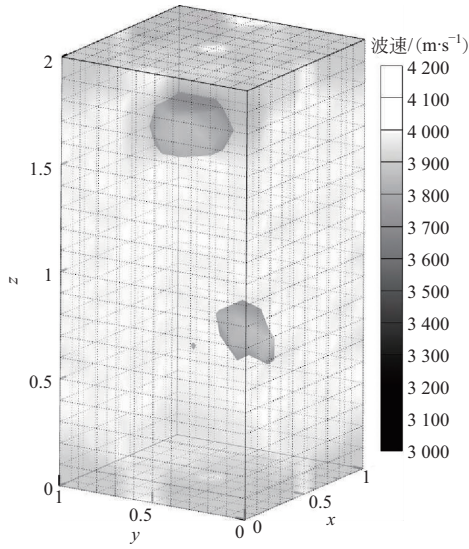


图 8 当  $r_x=0.50$  m,  $r_y=0.30$  m,  $r_z=0.70$  m, 球状缺陷尺寸  $r_d$  不同时, 缺陷尺寸对成像效果的影响

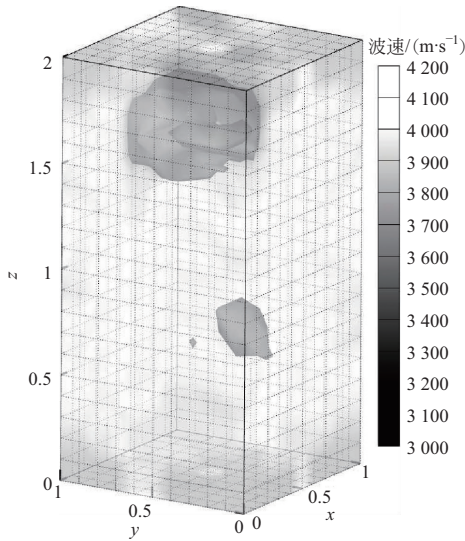
Fig. 8 When  $r_x=0.50$  m,  $r_y=0.30$  m,  $r_z=0.70$  m, and the spherical defect size  $r_d$  is different, Effect of defect size on imaging

图 9 分别研究了不同缺陷个数及尺寸对成像效果的影响。如图 9 所示, 当存在 2 个和 3 个球状缺陷时, 缺陷尺寸相同或不相同时, 成像均能够较为准确地反映缺陷的位置、尺寸及程度, 这说明该方法能够适用于多缺陷不同尺寸的工况, 具有良好的计算稳定性。

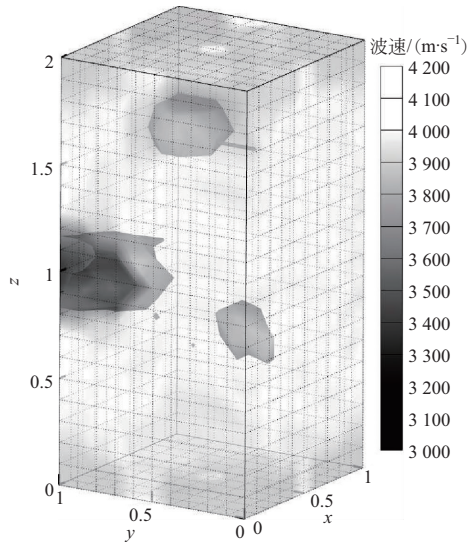
至此, 通过数值模拟验证了所提出算法识别球状和近似球状缺陷的可行性, 其在实际工程中的应用将在下一节中予以阐释。值得注意的是, 换能器的布置密度对成像精度有显著影响, 当换能器布置间距较大时, 层析成像的精度会随着换能器布置密度的增加而提升, 同时换能器布置成本以及三维层析成像的计算代价也会相应提升; 当换能器布置过密时, 层析成像反演计算往往会由于多解性原因而陷入局部最优解<sup>[19]</sup>, 并最终影响成像质量。因此在实际工程应用中, 有必要考虑换能器布置成本以及计算能力, 在解释精度的要求下适当选择换能器布置密度。以球状缺陷为例, 当换能器间距约为缺陷半径一半时, 可获得较好的层析成像效果(如图 6(c) 所示)。



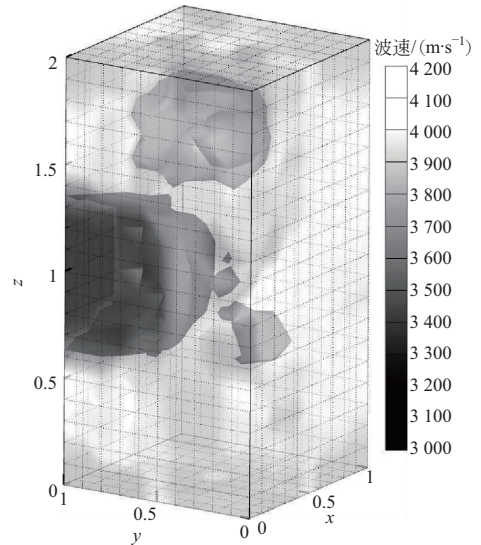
(a) 2个球状缺陷:  $r_{d1}=r_{d2}=0.20$  m



(b) 2个球状缺陷:  $r_{d1}=0.20$  m,  $r_{d2}=0.30$  m



(c) 3个球状缺陷:  $r_{d1}=r_{d2}=r_{d3}=0.20$  m



(d) 3个球状缺陷:  $r_{d1}=0.20$  m,  $r_{d2}=0.30$  m,  $r_{d3}=0.40$  m

图9 当  $r_{x2}=0.70$  m,  $r_{y2}=0.70$  m,  $r_{z2}=1.50$  m;  
 $r_{x3}=0.20$  m,  $r_{y3}=0.70$  m,  $r_{z3}=1.00$  m,  
不同缺陷个数及尺寸对成像效果的影响

Fig. 9 When  $r_{x2}=0.70$  m,  $r_{y2}=0.70$  m,  $r_{z2}=1.50$  m;  
 $r_{x3}=0.20$  m,  $r_{y3}=0.70$  m,  $r_{z3}=1.00$  m, Effect of the  
number and size of different defects on imaging

## 4 工程案例应用

### 4.1 工程概况

该大桥位于浙江省杭州市钱塘江河口段,其主桥墩及过渡墩均采用单一柱状结构,与桩基础之间为单桩独柱形式。桩基础施工采用 C30 等级水下混凝土浇筑成直径为 3.8 m 的大直径钻孔灌注桩。

在质量控制阶段,通过传统超声波透射法对桩基进行了检测。检测过程中,发现 13 号桩在 50.0~55.0 m 高度范围内存在缺陷。为了深入分析缺陷的空间分布及混凝土的质量,施工现场通过桩体预埋的 4 根声测管进行了超声波三维层析成像检测,其中声测管布置如下图 10 所示<sup>[31]</sup>。

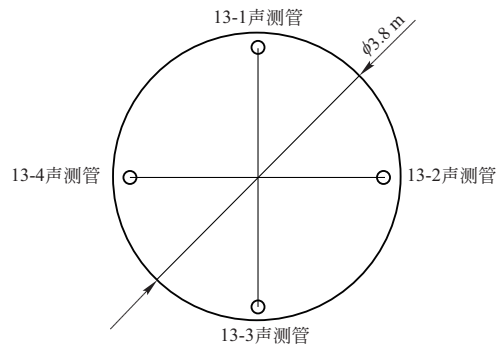


图 10 声测管布置图

Fig. 10 Acoustic tube layout diagram

## 4.2 现场数据勘测

13号灌注桩的各声测管剖面测试参数见下表1。

表1 13号灌注桩声波观测系统参数

剖面编号	测孔深/m	测点间距/m	测孔间距/m
1-2			2.35
1-3			3.35
1-4	5.0	0.2	2.35
2-3			2.35
2-4			3.35
3-4			2.35

在13号桩深度50.0~55.0 m段,通过预埋的4根声测管首先进行传统超声波透射法检测,从桩底自下而上进行测试,发射和接收换能器的竖向移动间距为20 cm。根据各剖面声波射线的走时情况,可以绘制波速沿深度分布图(如下图11),并初步预测缺陷所在的大致位置。

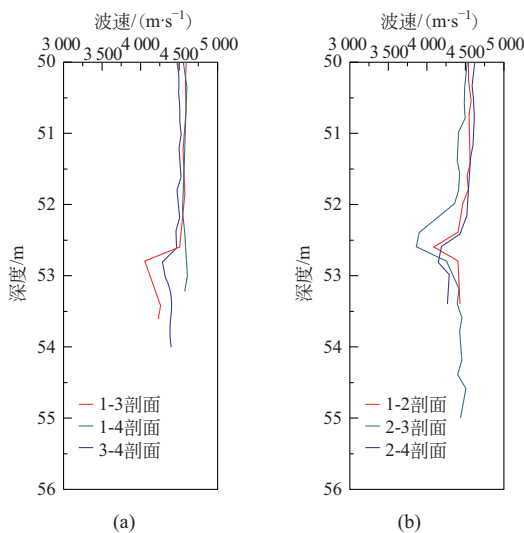


图11 水平射线深度分布图

Fig. 11 Horizontal ray distribution along depth

由图11可见,1-2检测剖面在孔深52.6 m处混凝土波速相对偏低,最小波速为4087 m/s;1-3检测剖面在孔深52.8~53.6 m段混凝土波速相对偏低,最小波速为4056 m/s;1-4剖面未见异常;2-3检测剖面在孔深52.2~52.8 m段混凝土波速相对较低,最小波速为3871 m/s;2-4剖面在52.6~52.8 m段混凝土波速相对较低,最小波速为4146 m/s;3-4剖面混凝土波速未见明显异常。

根据上述分析,可以判断混凝土缺陷的平面分布大概如下图12所示,主要位于声测管13-2和13-3附近,但未能进一步确定其位置、形态及缺陷程度

等信息。

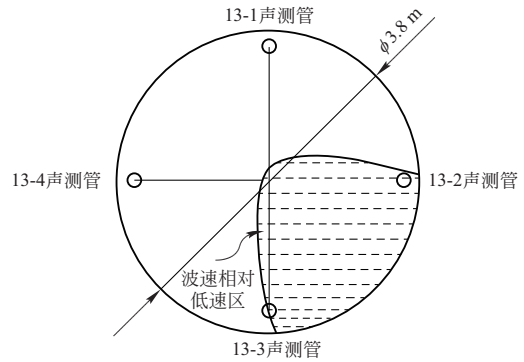


图12 桩身混凝土缺陷分布平面示意图

Fig. 12 Plane diagram of distribution of defects in concrete

## 4.3 三维层析成像与分析

如下图13建立 $xOy$ 平面坐标,其中13号桩13-1声测管、13-2声测管、13-3声测管、13-4声测管的 $xy$ 坐标分别为(2.35, 2.35)、(2.35, 0.0)、(0.0, 0.0)、(0.0, 2.35)。 $z$ 轴取向向下为正方向,研究的深度区间为50.0~55.0 m。桩身被构建为一个 $2.35\text{ m} \times 2.35\text{ m} \times 5.0\text{ m}$ 三维空间分析域,该分析域进一步被划分为2500个 $0.235\text{ m} \times 0.235\text{ m} \times 0.20\text{ m}$ 的网格,其中波速信息集成于各个网格节点(即波源)上。

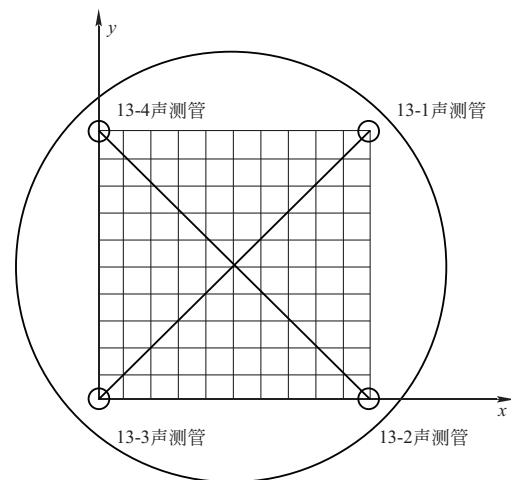


图13  $xOy$ 平面坐标

Fig. 13  $xOy$  plane coordinates

13号桩深度50.0~55.0 m段经本文所提出的层析成像优化算法得到基桩内部缺陷的三维重构。如图14(a)所示,观察三维成像结果,可以看到混凝土缺陷分布水平方向主要位于声测管13-2与13-3附近,沿深度方向主要分布在52.2~52.8 m深度范围。取缺陷较为清晰的深度52.6 m处剖面(如图14(b)所

示), 相比于现场水平射线速度分布预测的结果(如图 12), 图 14(b) 其能够更为直观且准确地展示混凝土低速区分布, 可以证明所提出的三维超声波层析成像优化算法的合理性和工程适用性。

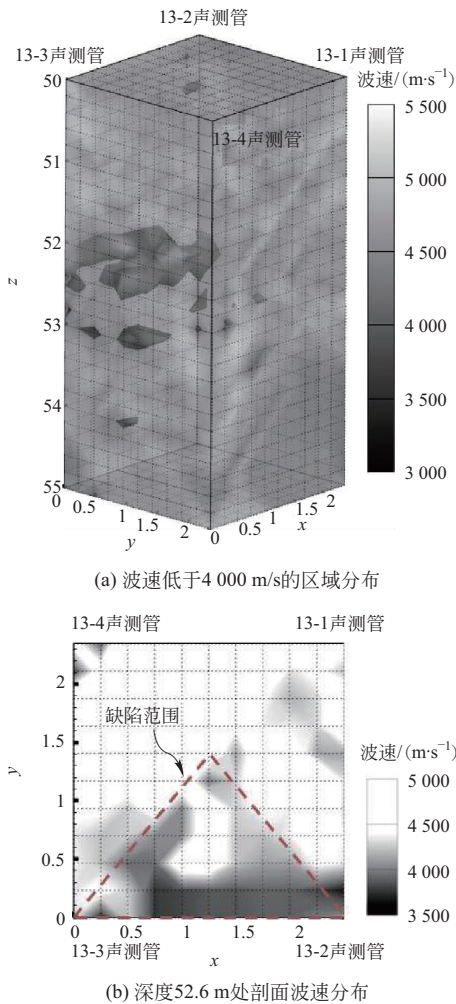


图 14 基桩内部缺陷三维重构图及剖面分析  
Fig. 14 Three-dimensional reconstruction and cross-sectional analysis of inter defects in foundation piles

## 5 结 论

在本研究中, 针对传统超声波透射法在基桩检测中的局限性, 提出了一种基于三维空间路径追踪的混凝土基桩层析成像优化算法。通过有限元分析软件 ABAQUS 进行数值模拟验证, 并对关键技术参数进行了深入分析。最终, 将该技术应用于实际工程案例, 验证了其在工程检测中的有效性和适用性。综合全文研究, 得出以下结论:

(1) 针对传统超声波透射法检测技术存在的局限性, 本文提出了一种基于三维空间路径检索的超声

波层析成像技术, 涵盖优化场源点分布模型、波源点传播历时关系、三维射线路径检索以及考虑空间场修正的优化反演算法等多项方案, 以实现混凝土基桩内部结构和潜在缺陷的精确评估。

(2) 通过有限元分析软件 ABAQUS 开展数值模拟验证, 并进一步分析影响成像质量的关键技术参数, 包括换能器布置密度、场源点加密系数、缺陷数量及其尺寸等。结果表明, 基于三维空间路径追踪的混凝土基桩层析成像技术不仅能够快速且准确定位三维分析区域内的潜在质量缺陷, 并且具有良好的计算可靠性。

(3) 将基于三维空间路径追踪的混凝土基桩层析成像技术应用于浙江省杭州市钱塘江某大桥桩基础实际工程案例, 验证了该技术在实际工程中的可行性和适用性, 可以为大直径混凝土基桩潜在缺陷的位置、尺寸及程度分析提供参考依据。

## 参 考 文 献

- [1] DAVIS A G. Nondestructive evaluation of existing deep foundations [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 1995, 9(1): 57-74.
- [2] 吴君涛, 王奎华, 肖偲, 等. 弹性支承桩周围土振动响应解析解及其波动规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(10): 2384-2393. (WU Juntao, WANG Kuihua, XIAO Si, et al. An analytical solution of dynamic response of soil around elastic bearing pile [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(10): 2384-2393. (in Chinese))
- [3] 王奎华, 谢康和, 曾国熙. 有限长桩受迫振动问题解析解及其应用 [J]. 岩土工程学报, 1997, 19(6): 27-35. (WANG Kuihua, XIE Kanghe, ZENG Guoxi. Analytical solution to vibration of finite length pile under exciting force and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(6): 27-35. (in Chinese))
- [4] 王奎华, 谢康和, 曾国熙. 变截面阻抗桩受迫振动问题解析解及应用 [J]. 土木工程学报, 1998, 31(6): 56-67. (WANG Kuihua, XIE Kanghe, ZENG Guoxi. An analytical solution to forced vibration of foundation pile with variable section impedance and its application [J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(6): 56-67. (in Chinese))
- [5] LI D Q, ZHANG L M, TANG W H. Reliability evaluation of cross-hole sonic logging for bored pile integrity [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(9): 1130-1138.
- [6] CHERNAUSKAS L R, PAIKOWSKY S G. Defect detection and examination of large drilled shafts using a new cross-hole sonic logging system [C]//Performance Confirmation of Constructed Geotechnical Facilities. Amherst, Massachusetts: American Society of Civil Engineers, 2000: 66-83.
- [7] 黄柳云, 王家全, 吴辉琴, 等. 基于声透法和钻芯法建

- 立桩基混凝土测强曲线的研究[J]. 混凝土, 2013(1): 135-138. (HUANG Liyun, WANG Jiaquan, WU Huiqin, et al. Research on the concrete strength of percussion drilling pile tested by crosshole sonic logging [J]. Concrete, 2013(1): 135-138. (in Chinese))
- [8] 李典庆, 吴帅兵, 周创兵. 基于贝叶斯理论的灌注桩多个缺陷统计特性分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2492-2497. (LI Dianqing, WU Shuaibing, ZHOU Chuangbing. Evaluation of statistics of multiple defects in bored piles using Bayesian theory [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2492-2497. (in Chinese))
- [9] 吴君涛, 王奎华, 高柳, 等. 考虑桩身材料阻尼的桩基纵向振动积分变换解及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(9): 2305-2312. (WU Juntao, WANG Kuihua, GAO Liu, et al. Study on longitudinal vibration of a viscoelastic pile by integral transformation and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(9): 2305-2312. (in Chinese))
- [10] WU J T, WANG K H, GAO L, et al. Study on longitudinal vibration of a pile with variable sectional acoustic impedance by integral transformation [J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(6): 1857-1870.
- [11] 李鲁忠. 采用钻芯法检测端承型大直径灌注桩承载力的探讨[J]. 建筑科学, 2014, 30(9): 103-106. (LI Luzhong. Discussion about testing the bearing capacity of end bearing large-section in situ concrete pile by core drilling method [J]. Building Science, 2014, 30(9): 103-106. (in Chinese))
- [12] 史三元, 郭周超, 商冬凡, 等. 超声法结合钻芯法检测大体积混凝土内部缺陷[J]. 混凝土, 2011(4): 137-138, 141. (SHI Sanyuan, GUO Zhouchao, SHANG Dongfan, et al. Detection of mass concrete internal defects by ultrasonic combined with core drilling method [J]. Concrete, 2011(4): 137-138, 141. (in Chinese))
- [13] WHITE B, NAGY M, ALLIN R. Comparing cross-hole sonic logging and low-strain integrity testing results [C]// Proceedings of the Eighth International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles. Lisbon: Stress Wave, 2008.
- [14] 李廷, 徐振华, 罗俊. 基桩声波透射法检测数据评判体系研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3165-3172. (LI Ting, XU Zhenhua, LUO Jun. Study of analysis method for collected data of integrity testing of piles by ultrasonic crosshole testing [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3165-3172. (in Chinese))
- [15] 张杰, 沈霄云, 刘明贵. 智能化桩基超声波 CT 检测系统研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 1197-1200. (ZHANG Jie, SHEN Xiaoyun, LIU Minggui. Study of intelligent pile ultrasonic CT testing system [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 1197-1200. (in Chinese))
- [16] 张建中, 陈世军, 余大祥. 最短路径射线追踪方法及其改进[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(1): 146-150. (ZHANG Jianzhong, CHEN Shijun, YU Daxiang. Improvement of shortest path ray tracing method [J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(1): 146-150. (in Chinese))
- [17] 张美根, 程冰洁, 李小凡, 等. 一种最短路径射线追踪的快速算法[J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1467-1474. (ZHANG Meigen, CHENG Bingjie, LI Xiaofan, et al. A fast algorithm of shortest path ray tracing [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(5): 1467-1474. (in Chinese))
- [18] 王奎华, 于喆, 项驰轩, 等. 一发三收式桩基声波透射检测技术及数值模拟分析[J]. 中国测试, 2023, 49(1): 1-6. (WANG Kuihua, YU Zhe, XIANG Chixuan, et al. One-launcher-three-receiver sonic logging technique for pile foundation and its numerical simulation analysis [J]. China Measurement & Test, 2023, 49(1): 1-6. (in Chinese))
- [19] 王珂, 吴君涛, 于喆, 等. 混凝土基桩超声波层析成像技术优化[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2023, 57(4): 805-813. (WANG Ke, WU Juntao, YU Zhe, et al. Optimization of ultrasonic tomography technology for concrete pile foundation [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2023, 57(4): 805-813. (in Chinese))
- [20] 于喆, 王奎华, 吴君涛. 基于改进克里金法的基桩缺陷空间插值研究[J]. 地基处理, 2023, 5(5): 376-382, 450. (YU Zhe, WANG Kuihua, WU Juntao. Research on spatial interpolation of pile defects based on improved Kriging method [J]. Journal of Ground Improvement, 2023, 5(5): 376-382, 450. (in Chinese))
- [21] 刘聪然. 混凝土超声波层析成像正反演方法数值研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016. (LIU Congran. Numerical research of forward and inverse methods of concrete ultrasonic tomography [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016. (in Chinese))
- [22] 黄靓. 混凝土超声波层析成像的理论方法和试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2008. (HUANG (Jing) Liang). Methodology and experiment research on concrete ultrasonic computerized tomography [D]. Changsha: Hunan University, 2008. (in Chinese))
- [23] 刘松, 顾继俊. 基于 Abaqus 的超声波 A 扫法的仿真实验验证[J]. 设备管理与维修, 2019(16): 23-26. (LIU Song, GU Jijun. The simulation experiment based on Abaqus ultrasonic A-scan method validates [J]. Plant Maintenance Engineering, 2019(16): 23-26. (in Chinese))
- [24] 杨杰, 王浩多, 程琳. 混凝土结构内部缺陷超声波 CT 检测图像特征[J]. 水电能源科学, 2019, 37(11): 127-130, 197. (YANG Jie, WANG Haoduo, CHENG Lin. Experimental study on image characteristics of ultrasonic CT detection of internal defects in concrete structures [J]. Water Resources and Power, 2019, 37(11): 127-130, 197. (in Chinese))

(下转第 99 页)

- [27] KRAUS J F, BENSON C H, ERICKSON A E, et al. Freeze-thaw cycling and hydraulic conductivity of bentonitic barriers[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(3): 229-238.
- [28] 赵贵涛, 韩仲, 邹维列, 等. 干湿、冻融循环对膨胀土土-水及收缩特征的影响[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(6): 1139-1146. (ZHAO Guitao, HAN Zhong, ZOU Weilie, et al. Influences of drying-wetting-freeze-thaw cycles on soil-water and shrinkage characteristics of expansive soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(6): 1139-1146. (in Chinese))
- [29] HUBER K. Calcium-induced shrinking of polyacrylate chains in aqueous solution [J]. The Journal of Physical Chemistry, 1993, 97(38): 9825-9830.
- [30] ABOLLINO O, ACETO M, MALANDRINO M, et al. Adsorption of heavy metals on Na-montmorillonite. Effect of pH and organic substances[J]. Water Research, 2003, 37(7): 1619-1627.
- [31] TANG L, CONG S Y, GENG L, et al. The effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of expansive soils [J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 145: 197-207.
- [32] 任孟健. 改性膨润土组合衬垫抗渗吸附特性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021. (REN Mengjian. Research on modified GCL liner based on the improvement of Cr(VI) adsorption and salt resistance [D]. Changsha: Hunan University, 2021. (in Chinese))
- [33] 张少秋. 复杂服役条件下聚合物改性膨润土-砂混合物的防渗性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2023. (ZHANG Shaoqiu. Study on containment performance of polymer-modified bentonite-sand mixtures under complex service conditions [D]. Changsha: Hunan University, 2023. (in Chinese))

杨 微(1986— ),女,博士,教授。主要从事环境岩土工程的研究。

何逸飞(1999— ),男,硕士研究生。主要从事环境岩土工程的研究。

任孟健(1996— ),男,硕士,工程师。主要从事环境岩土工程的研究。

陈仁朋(1972— ),男,博士,教授。主要从事岩土体土拱效应、城市地下空间开发技术、交通岩土工程技术等研究。

王瀚霖(1989— ),男,博士,教授。主要从事岩土体土拱效应、城市地下空间开发技术、交通岩土工程技术等研究。

袁 平(1981— ),男,学士,高级工程师。主要从事冶金矿山尾矿库的研究。

郭承晖(1985— ),男,学士。主要从事冶金矿山尾矿库的研究。

(上接第 86 页)

- [25] SU B L, ZHANG Y H, PENG L H, et al. The use of simultaneous iterative reconstruction technique for electrical capacitance tomography[J]. Chemical Engineering Journal, 2000, 77(1/2): 37-41.
- [26] SU B L, ZHANG Y H, PENG L H, et al. The use of simultaneous iterative reconstruction technique for electrical capacitance tomography[J]. Chemical Engineering Journal, 2000, 77(1/2): 37-41.
- [27] WOLF D, LUBK A, LICHTER H. Weighted simultaneous iterative reconstruction technique for single-axis tomography [J]. Ultramicroscopy, 2014, 136: 15-25.
- [28] 吴守亮. 基于 Matlab 的三维数字地形模拟及空间分析 [J]. 测绘工程, 2011, 20(3): 54-57. (WU Shouliang. The study of 3D digital terrain simulation and spatial analysis based on MATLAB [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2011, 20(3): 54-57. (in Chinese))
- [29] 郭超, 杜思宏, 徐晨. 冻融循环作用下含缺陷混凝土三维数值模拟[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2023, 39(1): 121-129. (GUO Chao, DU Sihong, XU Chen. Three dimensional mesoscopic numerical simulation of concrete with defects under freeze-thaw cycles [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2023, 39(1): 121-129. (in Chinese))
- [30] 刘稳. 混凝土介质隐患超声波 CT 探测技术研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2015. (LIU Wen. Research on ultrasonic CT technology to detect concrete medium hidden danger [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2015. (in Chinese))
- [31] 陈文华, 侯靖, 黄世强, 等. 弹性波层析成像技术开发及其工程应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2022.

叶启扬(2000— ),男,硕士研究生。主要从事桩基动力理论及测试技术开发研究。

吴君涛(1992— ),男,博士,研究员。主要从事桩基动力理论及测试技术开发研究。

易恩泽(2001— ),男,博士研究生。主要从事桩基动力理论及测试技术开发研究。

王奎华(1965— ),男,博士,教授。主要从事桩基动力学理论、桩基工程及土工测试方法研究。

张智卿(1982— ),男,博士,教授。主要从事土-结构相互作用方面的教学的科研。

汤旅军(1984— ),男,博士,教授。主要从事岩土工程相关领域研究。