

DOI: 10.11779/CJGE2019S1057

电磁波 CT 技术在钻孔灌注桩后压浆效果检测中的应用研究

黄生根, 胡永健*, 付卓, 李忠爽

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 利用 MATLAB 对不同后压浆情况进行数值模拟, 对水泥浆的扩散方式和加固区的形态分布规律进行了分析研究, 并结合台州湾杜下浦大桥桥桩 CT 检测成果, 得到以下主要结论: ①ART 和 SIRT 算法均是收敛的, ART 算法迭代 10 次, SIRT 算法迭代 50 次, 反演结果已趋于稳定; ②基于直射理论的 ART 和 SIRT 算法均可以识别出模型桩体下界面、桩端固结体形态和浆液上返高度, 但整体而言 SIRT 算法效果更好; ③台州湾杜下浦大桥的桥桩试验表明, 根据反演结果推测的压浆前后桩周地下介质分布状态与实际情况有较好的符合度, 这一定程度上体现了数值模拟中所总结的压浆效果识别规律在工程实际中的适用性。

关键词: 电磁波; 后压浆; CT; 吸收系数

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)S1-0225-04

作者简介: 黄生根(1967—), 男, 博士, 教授, 主要从事桩基础、地基处理和基坑等方面的教学和科研。E-mail: huangshgr@163.com。

Application of cross-hole electromagnetic wave CT in detection of post-grouting effect

HUANG Sheng-gen, HU Yong-jian, FU Zhuo, LI Zhong-shuang

(College of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Different post grouting conditions are simulated by using MATLAB, and the laws of the diffusion pattern of the cement slurry and the distribution of the shape of the reinforcement zone are analyzed. Combined with the CT detection results of piles of Duxiapu Bridge in Taizhou Bay, the following main conclusions are drawn: (1) ART and SIRT algorithms are convergent, the inversion results become stable when the ART algorithm iterates 10 times and the SIRT algorithm iterates 50 times. (2) Both the ART and SIRT algorithms based on the straight-line theory can identify the interface of the model piles, the shape of the pile-end consolidation, and the height of the slurry, and the SIRT algorithm is better in general. (3) The pile tests of Duxiapu Bridge in Taizhou Bay show that the distribution of underground media around the piles predicted by the inversion results is in good agreement with the actual situation, which reflects the applicability of the identification laws of the grouting effect summarized in numerical simulation in engineering practice to some extent.

Key words: electromagnetic wave; post grouting; CT; absorption coefficient

0 引言

目前国内外对钻孔灌注桩的后压浆加固机理的研究主要集中在基桩承载力试验数据的统计分析上, 理论研究远落后于工程实践^[1], 本文从可视化角度检测后压浆固结体在地层中的形态分布, 评价后压浆的加固效果, 为进一步研究后压浆的加固机理提供依据。目前, 国内外检测压浆后浆液固结体形态分布的手段主要有钻孔取芯法, 超声波 CT 法等, 取得了一定的成果。但传统的检测手段还存在着一些问题: 钻孔取芯法不能反映出后压浆加固体的整体分布形态; 超声

波 CT 法的能量衰减太快, 容易发生散射。电磁波 CT 技术作为一种物探手段, 工作周期短, 设备集成化程度高, 主要利用地层中不同介质对电磁波吸收程度不同, 通过反演介质吸收系数推测地层中介质的分布。因其透射距离远, 分辨率高, 适用范围广, 工作效率高, 近些年来受到学者关注。作为辅助手段, 曾被试验性的应用到压浆效果检测上, 但是目前还缺乏系统

收稿日期: 2019-04-28

*通讯作者 (E-mail: hyjtech@163.com)

的理论研究, 依旧处于探索阶段。因此, 研究井间跨孔电磁波 CT 技术在压浆效果检测上的应用有着很大的理论和经济意义^[2-5]。

1 跨孔电磁波 CT 工作原理

跨孔电磁波 CT 设备由主机、发射端和接收端 3 部分组成, 工作时在观测目标两侧布置发射井和接收井。根据电磁波传播理论, 电磁波的发射场强 E_0 与接收场强 E 之间存在关系:

$$E = E_0 \frac{e^{-\beta r}}{r} f(\theta) \sin \theta \quad (1)$$

式中, β 为介质对电磁波的吸收系数, r 为收发点之间的距离, θ 为接收点处天线与电场方向的夹角, $f(\theta)$ 为收发天线方向因子。

在工程地质领域, 影响介质电磁参数性质的因素主要是含水率、密实度和完整性等。基桩周围土体的完整性和结构性差、含水率高, 而桩体、水泥浆固结体含水率低、密实度高, 在对电磁波的吸收系数上必然存在较大差异。层析成像时, 即根据发射场强 E_0 和接收场强 E , 反演地下介质对电磁波的吸收系数 β , 再根据吸收系数变化情况推断地下介质的分布状态。

2 图像重建算法数值模拟分析

目前主要应用结果稳定, 可控性高的代数法进行反演。考虑到工程实际中可靠、经济的原则, 运用 ART 和 SIRT 两种代数法进行反演计算, 分析这两种算法的反演效果和识别规律, 达到指导实际生产的目的。

2.1 数值模型建立

为研究方便, 只考虑后压浆的渗透胶结和挤密作用, 并将研究目标近似化为规则几何体, 通过 MATLAB 软件编程, 构建如图 1 所示的 3 种桩土模型, 进行压浆前后的数值模拟试验研究。3 种介质模型的观测系统均采用定发装置, 发射和采样间隔均为 1 m。初始电场常数为 -5 dB, 发射频率为 4 MHz。

压浆前桩土模型如图 1 (左) 所示, 模型为 60 m × 10 m 的探测剖面, 网格划分为 60 m × 10 m, 左右两侧分别为发射孔和接收孔。中部设置一根均质基桩, 桩长 50 m、桩径 2 m, 桩体的吸收系数为 0.1 Np/m; 桩体外为土体, 根据工程经验, 吸收系数设置为 1 Np/m。

桩端压浆模型如图 1 (中) 所示, 根据现有后压浆加固理论和工程经验, 一般认为压浆时会在压浆点形成水泥浆固结体, 且浆液沿桩侧上返, 并通过挤密、渗透作用, 改善桩周土体的工程性质。据此, 在压浆前模型基础上, 在桩端设置 4 m × 3 m 固结体, 吸收系数设为 0.3 Np/m。将挤密和渗透胶结作用区统一用

挤密区表示。在桩端固结体四周及以上 15 m 桩侧范围内, 设置厚度为 1 m 的挤密区, 吸收系数设为 0.6 Np/m。

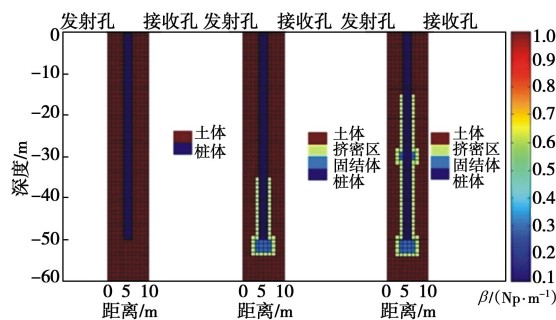


图 1 桩土模型

Fig. 1 Pile-soil model

桩端桩侧压浆模型如图 1 (右) 所示, 在压浆前模型基础上, 在桩端设置 4 m × 3 m 固结体, 在桩侧 30 m 深度处设置两个 1 m × 2 m 固结体, 并在固结体外侧和桩侧 15 m 深度范围下设置厚度 1 m 的挤密区, 以模拟桩端和桩侧同时压浆, 各区吸收系数设置同前。

2.2 反演迭代次数讨论

分别运用 ART 和 SIRT 算法, 对压浆前桩土模型进行模拟反演, 分析两种算法的反演迭代次数与结果收敛性的关系。

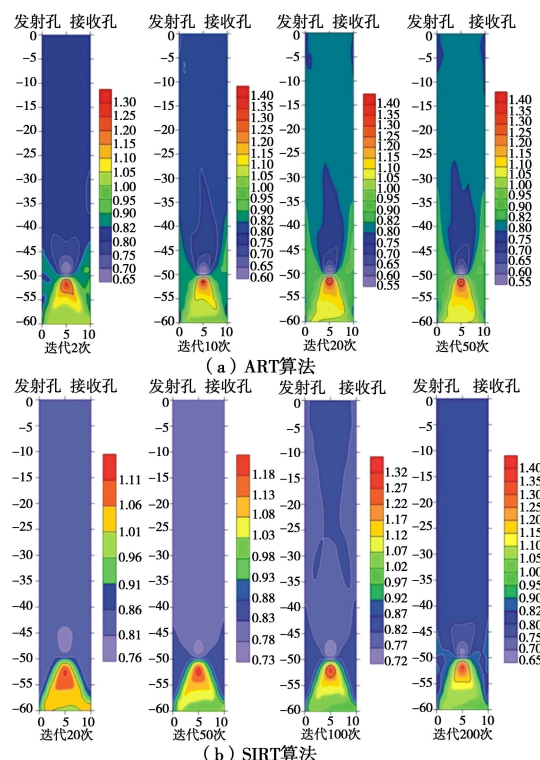


图 2 算法收敛性与迭代次数的关系

Fig. 2 Relationship between convergence and number of iterations

图 2 (a) 显示了采用 ART 算法分别迭代 2 次、10 次、20 次和 50 次的反演结果。图 2 (b) 显示了 SIRT 算法选取分别迭代 20 次、50 次、100 次和 200 次的反演结果。对比两种算法的反演效果, 可以得出

如下结论: 两种反演算法均可收敛, ART 算法迭代 10 次, SIRT 算法迭代 50 次时, 反演结果已趋于稳定。

2.3 压浆模型模拟结果分析

根据前文结论, 采用 ART 算法迭代 10 次, SIRT 算法迭代 50 次, 限制接收角为 45°, 分别对桩端压浆和桩端桩侧压浆模型进行模拟反演, 结果如图 3 所示。

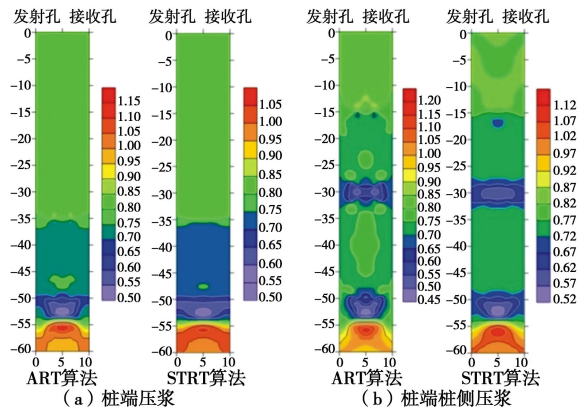


图 3 压浆后反演结果

Fig. 3 Inversion results after post grouting

分析图 3 (a): 在 50~53 m 深度处存在矩形异常区, 吸收系数较小, 约为 0.5 Np/m, 判断为压浆固结体; 在 35~50 m 深度处存在较大块状异常区, 吸收系数约为 0.7 Np/m, 判断为上返挤密区。

分析图 3 (b): 在 50~53 m 深度处和 31~32 m 深度处存在矩形异常区, 吸收系数较小, 为 0.5~0.55 Np/m, 判断为压浆固结体; 在 15~29 m 深度处和 31~50 m 深度处存在较大块状异常区, 吸收系数约为 0.7~0.75 Np/m, 判断为上返挤密区。

此外, ART 算法对固结体识别敏感, 但边界扭曲, 并在固结体棱角附近有极化的对称异常区, 会干扰对上返挤密区的识别。当桩土压浆模型变得复杂, ART 算法反演稳定性下降, 虚假异常增多。而 SIRT 算法虽然对固结体竖向边界识别稍差, 但是稳定性更好。

3 现场试验

3.1 工程概况

试验桩选取浙江省台州湾杜下浦大桥左幅 7 号桥墩的 7-2 号和 7-3 号基桩进行后压浆效果电磁波 CT 检测。设计桩长 56 m, 桩径 1.5 m。桥址区揭露地层如图 4 所示。基桩均采用桩端直管压浆, 压浆量为 4.2 t, 水灰比为 0.4。检测孔为 $\Phi 60$ PVC 管, 桩内管长 57 m, 桩外管长 60 m。检测孔布置信息见图 5 和表 1。

表 1 检测剖面 and 孔距

| Table 1 Number of detection profile and distances between holes | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 剖面 | C1-C3 | C6-C1 | C6-C2 | C6-C3 | C5-C3 | C6-C5 | C6-C4 |
| 孔距/m | 8.75 | 9.80 | 4.60 | 4.15 | 5.65 | 6.90 | 4.55 |

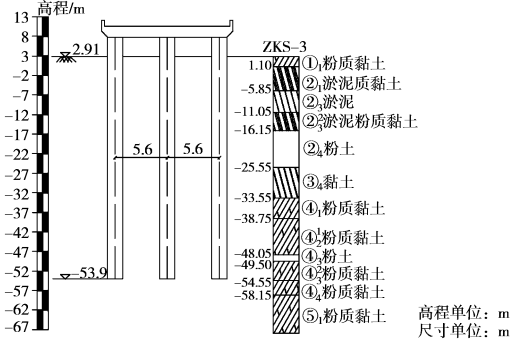


图 4 7 号桥墩地层剖面图

Fig. 4 Stratigraphic profile of pier No. 7

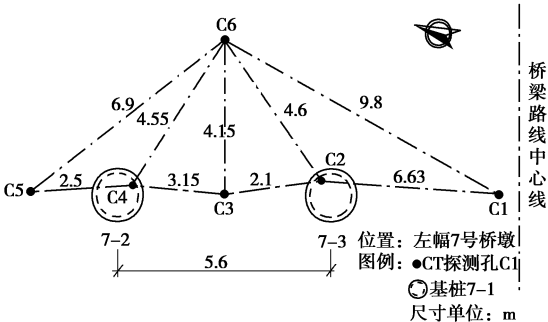


图 5 桩位与 CT 检测孔布置图

Fig. 5 Layout of pile position and CT detection holes

3.2 试验结果分析

试验依据对比原则, 分别对压浆前后的基桩进行检测。反演采用 SIRT 算法。压浆前后的反演分别利用压浆前桩土模型和桩端压浆模型。并将反演结果分为跨桩和桩侧剖面两组。

跨桩剖面反演结果如图 6 所示。分析可知, 桩端压浆前, 55~56 m 深度处出现分界面, 推断为基桩下界面。跨桩剖面的吸收系数偏大是由桩内钢筋笼对电磁波的干扰所致。桩端压浆后, C1-C3 剖面底部靠 C3 方向吸收系数减小为 0.98 Np/m, 推断 7-3 号桩桩端固结体向 C3 方向形成单向扩大头, 横向分布范围 2 m 左右, 浆液上返效果不明显。C5-C3 剖面底部吸收系数减小明显, 约为 0.7 Np/m, 推断 7-2 号桩浆液分别向 C3 和 C5 方向扩散, 形成较均匀的固结体, 横向范围超过 3 m; 55~40 m 深度吸收系数减小为 1.4 Np/m, 推断为浆液上返区, 上返高度 15 m。

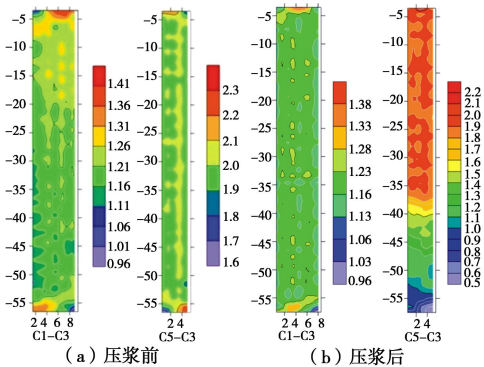


图 6 跨桩剖面视吸收系数分布

Fig. 6 Distribution of apparent absorption coefficient across piles

基桩压浆前后桩侧剖面的反演结果见图 7。分析可知, 桩端压浆之前各剖面吸收系数普遍较大, 这与桩侧土体主要为淤泥质粉质黏土和粉质黏土, 结构破碎、含水率高, 电磁波衰减迅速的实际情况相符。C6-C2、C6-C3 和 C6-C4 剖面吸收系数均大于 2 Np/m , 表明靠近桩体的剖面钢筋笼影响依然存在。桩端压浆后, 各剖面底部吸收系数均有所减小。说明压浆浆液对周围土体进行了渗透固结和挤压, 使桩侧土体的密实度等提高明显。同时, 各剖面吸收系数减小高度根据离桩体距离不同而异。距离桩体最近的 C6-C2、C6-C3 和 C6-C4 剖面高度相对较大, 约 $10 \sim 15 \text{ m}$, 与图 6 中跨桩剖面所反映的上返高度基本吻合。C6-C1 剖面 and C6-C5 剖面距离桩体稍远, 探测到的高度范围稍小, 约 $2 \sim 6 \text{ m}$ 。

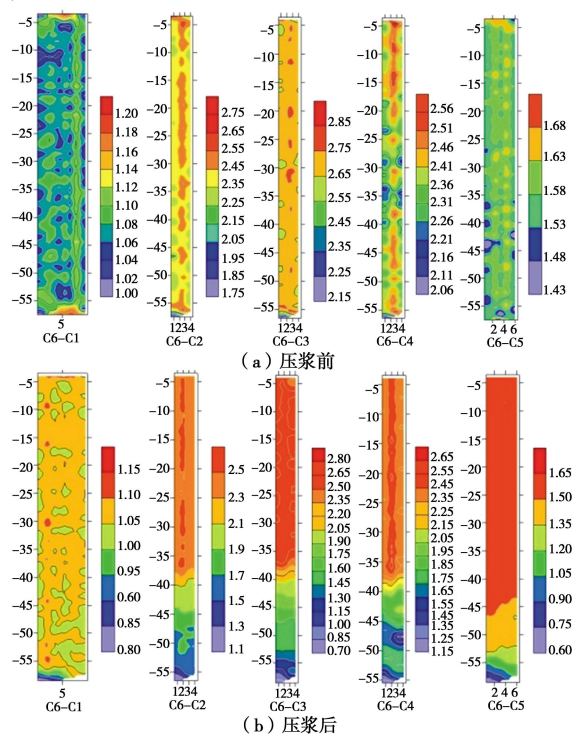


图 7 桩侧剖面视吸收系数分布

Fig. 7 Distribution of apparent absorption coefficient around piles

杜下浦大桥桥桩 CT 试验表明, 根据反演结果推测的压浆前后桩周地下介质分布状态与实际情况有较好的符合度, 这一定程度上体现了数值模拟中所总结的压浆效果识别规律的适用性, 可以发展成为一种新的基桩后压浆效果检测方法。

4 结 论

本文通过建立不同压浆模型, 根据模拟结果分析了 ART 和 SIRT 反演算法的特点、迭代次数的选择和地下介质识别规律, 并通过实际工程应用, 取得了较好的效果。得到如下结论:

(1) ART 和 SIRT 算法均是收敛的, ART 算法迭代 10 次, SIRT 算法迭代 50 次, 反演结果已趋于稳定。

(2) ART 算法对固结体的识别敏感, 但是边界扭曲, 并在固结体棱角附近出现极化的对称异常区, 对上返挤密区识别不利。且当桩土压浆模型变得复杂, ART 算法反演稳定性下降, 虚假异常增多。而 SIRT 算法虽然对固结体竖向边界识别稍差, 但是稳定性更好。

(3) 台州湾杜下浦大桥的桥桩试验表明, 根据反演结果推测的压浆前后桩周地下介质分布状态与实际情况有较好的符合度, 这在一定程度上反映了数值模拟所总结的压浆效果识别规律在工程实际中的适用性。

参考文献:

- [1] 黄生根, 彭从文. 灌注桩后注浆技术原理与工程实践[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 2016. (HUANG Sheng-gen, PENG Cong-wen. Principle and engineering practice of post-grouting technology[M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 2016. (in Chinese))
- [2] 何 剑, 赵海生, 谷秀萍, 等. 后注浆桩灌注的检测技术[C]// 中国西北部重大工程地质问题论坛. 西安, 2002. (HE Jian, ZHAO Hai-sheng, GU Xiu-ping, et al. Inspection technique of concrete filling pile after grout injection[C]// Forum on Major Engineering Geology Issues in Northwest China. Xi'an, 2002. (in Chinese))
- [3] 黄生根, 龚维明. CT 技术在超长桩后压浆效果检测中的应用研究[C]// 第一届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会. 昆明, 2006. (HUANG Sheng-gen, GONG Wei-ming. Application of CT technology in the detection of super-long pile post-grouting effect[C]// The 1st China Water Conservancy and Hydropower Geotechnical and Engineering Symposium. Kunming, 2006. (in Chinese))
- [4] 黄永林, 刘建达, 许汉刚, 等. 用超声波 CT 检测深桩基础压浆的分布与成形[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1148 - 1152. (HUANG Yong-lin, LIU Jian-da, XU Han-gang, et al. Checking distribution of post grouting at bottom of long piles by ultrasonic CT[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1148 - 1152. (in Chinese))
- [5] 李昌驭, 赵建华, 许 斌, 等. 钻孔灌注桩桩端后压浆机理及效果检测[J]. 工程质量, 2005(2): 46 - 49. (LI Chang-yu, ZHAO Jian-hua, XU Bin, et al. Mechanism & performance test of bored pile with post grouting at base[J]. Engineering Quality, 2005(2): 46 - 49. (in Chinese))

(责编: 胡海霞)