

doi: 10.11720/wtyht.2022.1580

柴伦炜. 井间超高密度电法探测基桩的模拟及应用[J]. 物探与化探, 2022, 46(5): 1283-1288. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1580>

Chai L W. A simulation and application of cross-well ultra-high-density resistivity imaging in the detection of foundation piles[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(5): 1283-1288. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1580>

井间超高密度电法探测基桩的模拟及应用

柴 伦 炜^{1,2}

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043; 2. 轨道交通工程信息化国家重点实验室, 陕西 西安 710043)

摘要: 为了提高基桩检测水平, 减少重大安全隐患, 基于 2.5 维井间超高密度电阻率的正反演数值模拟, 构建了单桩、长短桩和群桩 3 种地电模型, 分析其响应特征及规律; 鉴于基桩检测环境的复杂性, 结合两则基桩埋深探测的实例, 进一步阐述了该方法的应用特点和效果。研究表明: 井间超高密度电阻率成像技术应用于桩埋深检测, 具有精度高、施工灵活方便等优点, 可以大规模检测基桩的长度, 而不需要 1 个检测孔对应 1 根基桩, 极大提高了基桩埋深的探测水平。

关键词: 井间超高密度电阻率成像; 基桩; 桩埋深; 数值模拟

中图分类号: P631.1; U452 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2022)05-1283-06

0 引言

当前高层和超高层建筑中最常见的下部结构形式为桩基础, 常规的桩埋深检测方法有低应变法、高应变法、钻芯法、声波透射法^[1], 但都有一定的局限性。低应变方法^[2]有效检测范围为桩长和桩径比小于 30, 对于超长桩, 往往无法探测到桩底处的反射信号; 高应变方法^[3]检测需要一定操作空间, 重锤锤击时容易导致桩身损伤甚至产生破坏现象; 声波透射法^[4]要求预埋声测管, 而且桩径不小于 600 mm, 给施工带来不便, 同时又增加了成本; 钻芯法^[5]比较直接, 但是对桩身完整性有一定的破坏, 而且钻孔过程中容易出现偏钻, 造成误判^[6]。

针对这类问题, 本文在介绍井间超高密度电阻率成像技术^[7]原理的基础上, 对桩埋深检测^[8]中存在的疑点、难点, 开展单桩、长短桩以及群桩地电模型的模拟研究, 分析单桩、长短桩和群桩的响应特征; 结合江苏地区两则工程实例, 总结经验, 以提高基桩的检测水平。

1 方法原理

超高密度直流电法工作原理属电阻率的范畴, 是一种阵列式勘探思想, 野外测量时只需将全部电极(几十至上百根)置于测点上, 通过多芯电缆把所有电极连接至仪器, 然后利用程控电极转换开关和微机工程电测仪便可实现数据的快速和自动采集^[9]。超高密度电法一个采集过程包括了所有的装置类型, 对观测点多次覆盖, 提高数据的可信度, 同时提高了工作效率, 通过 2.5 维反演技术, 大大提高了勘探精度^[10]。

井间超高密度电阻率成像技术工作方式是在 2 个相邻检测孔中分别放入一定数量的电极, 进行一系列跨孔供电、测量, 实测 dV/I 数据后, 反演获得井—井之间的电阻率分布图, 分析岩土介质与电阻率间的对应关系, 进行地质信息译解^[11]。

利用有限单元法求解稳定电流场的位场分布时, 首先应用变分方法把所求解的边值问题转化为相应的变分问题, 即求泛函的极值问题; 然后将连续的求解区域离散化, 导出以各节点电位值为未知

收稿日期: 2021-10-25; 修回日期: 2022-04-26

基金项目: 中铁第一勘察设计院集团有限公司科研项目[院科 16-16]

第一作者: 柴伦炜(1990-), 男, 硕士, 工程师, 毕业于吉林大学地球探测与信息技术专业, 注册土木工程师(岩土), 注册一级建造师(市政), 主要从事岩土工程勘察与设计研究工作。Email: chailw2309@126.com

量的高阶线性方程组,最后求解方程组,得到各节点电位值,再做反傅氏变换,即可得到空间域稳定电流场的位场分布^[12]。

对正演计算所得的数据进行反演^[13],反演的偏微分方程为:

$$\frac{\partial \Phi(m)}{\partial m} = \frac{\partial \Phi_d(m)}{\partial m} + \lambda \frac{\partial \Phi_m(m)}{\partial m} = 0 ;$$

$$\Phi_d(m) = \| W_d [d_0 - d(m)] \|^2 ,$$

$$\Phi_m(m) = \| W_m (m_0 - m) \|^2 .$$

式中: m 为实测电阻率; λ 为拉格朗日算子; $d(m)$ 为正演迭代产生的电场数据; d_0 为实际测量的电场数据; m_0 为反演初始模型的电阻率; W_d 和 W_m 为加权因子,控制计算过程中对模型的修正量,取值有赖于实测数据的信噪比^[14]。

反演时,先设定理论地电模型,用理论地电模型做正演计算,得出理论电阻率数值;再计算实测数据与理论数据之间的拟合差^[15];然后对理论电阻率进行修正,得到一个新的理论电阻率分布模型;重复上述步骤,连续迭代直到拟合差足够小,把这时的理论

电阻率模型当作最终反演结果^[16]。

2 模型模拟研究

分别建立单桩、长短桩和群桩的地电模型,对模型进行正演,将正演数据进行反演,获得模型间超高密度电阻率法反演电阻率断面图,分析不同基桩形式的电性响应特征。模型统一设置两孔间距为 20 m,孔深为 32 m,模型网格按照 1 m×1 m 进行剖分, X 轴表示距离, Y 轴表示深度,背景电阻率为 100 $\Omega \cdot m$ 。

图 1a 为单桩模型的模拟结果。长桩的电阻率为 1 000 $\Omega \cdot m$,桩径 2 m,桩埋深 20 m,基桩位置 X 轴 10 m 位置处。反演图中在长桩位置处出现了高阻异常,推断桩埋深为 20 m。

图 1b 为长短桩模型的模拟结果。长短桩的电阻率均为 1 000 $\Omega \cdot m$,桩径均为 1 m,长桩埋深 20 m,短桩埋深 10 m,长短桩身分别位于 X 轴方向 15~16 m、2~3 m 处。从反演结果看,在已知长短桩位置

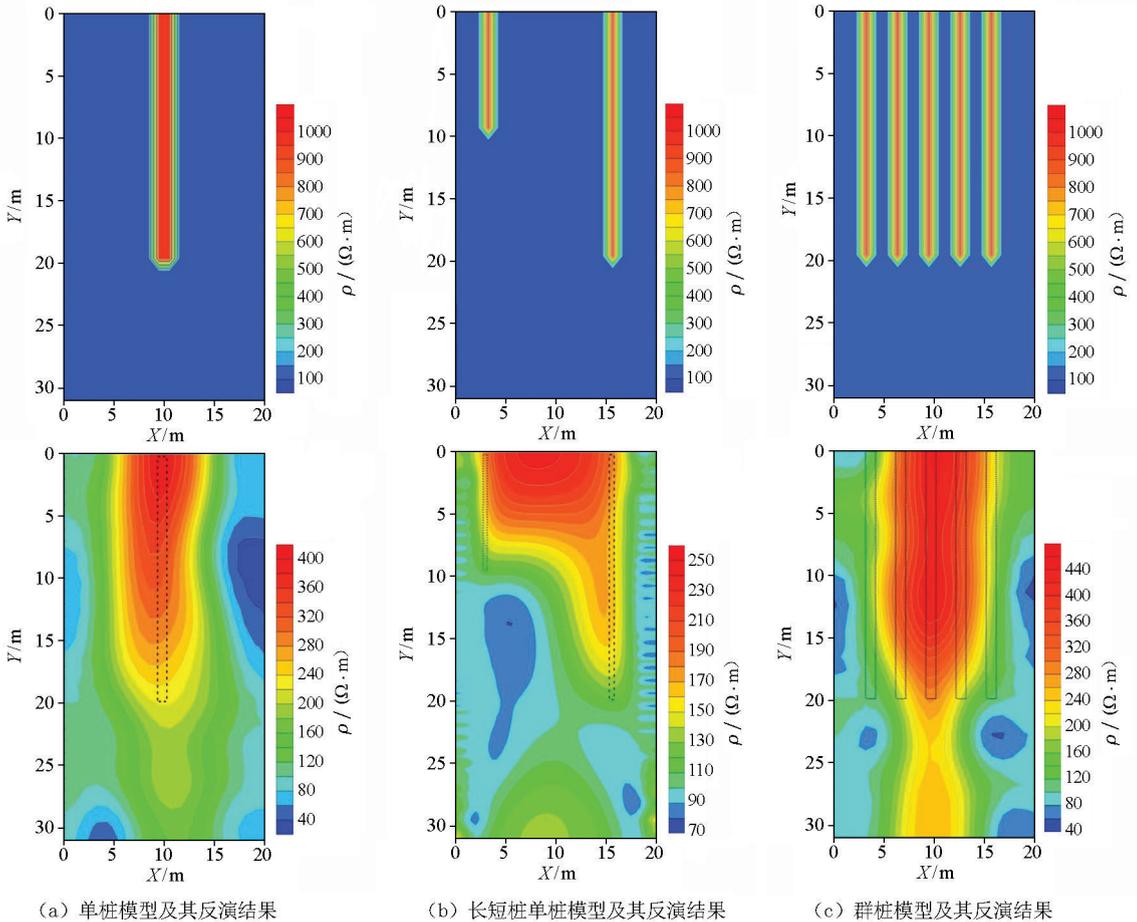


图 1 基桩模拟研究成果

Fig. 1 Research results of pile simulation

处均出现了高阻异常,推断短桩埋深为 10 m,长桩埋深为 20 m。

图 1c 为群桩模型的模拟结果。群桩高阻体电阻率为 $1\ 000\ \Omega \cdot \text{m}$,桩长 20 m,桩径 1 m,桩身分别位于 X 方向 3~4 m、6~7 m、9~10 m、12~13 m、15~16 m 处。反演结果显示在已知群桩位置处均出现了高阻异常,推断桩埋深为 20 m。

对比单桩、长短桩和群桩模型结果,该方法垂向分辨率较高,模型反演的异常深度与桩的实际埋深一致,表明该技术能够判断出桩的深度以及最长桩的位置。受电阻率体积效应^[17]影响,该方法横向分辨率较低,模型反演后异常范围比实际体积大;对于长短桩或群桩,该方法能够对已知桩位置的场地进行桩长探测,当进行“盲探”时则有一定局限性。

3 应用分析

下列两个实例都是通过井间超高密度电阻率成像技术探测桩基础的埋藏深度。实施钻孔时终孔孔径 91 mm,成孔后下 PVC 套管以保证不塌孔,在 PVC 塑料管上打密集小孔,保证两孔间导电性。为防止小孔被泥浆堵住,需要在 PVC 塑料管外部缠上纱布,并用塑料扎丝扎紧。

根据现场地层情况及桩本身的电性特征,通过

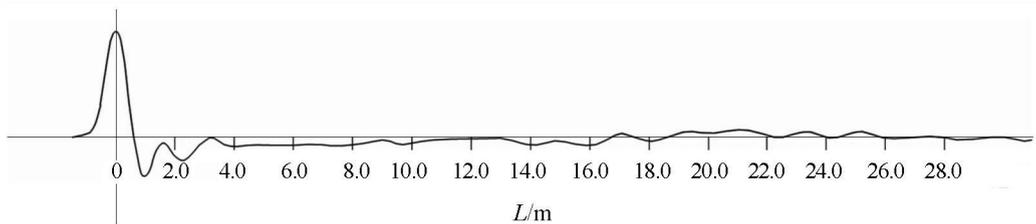


图 2 场地 1 低应变测桩成果

Fig. 2 Results of low-strain pile testing in Site 1

图 3 为场地 1 的井间超高密度电阻率反演成果,在已知桩身位置处(水平方向 4.25 m)出现高阻异常,异常体埋深在 23 m 附近。比对单桩模型反演成果(图 1a),推断出该沉管灌注桩桩底埋深为 23 m,由于体积效应影响,无法对该桩的桩径进行准确的判断。低应变 Y 方向 -2 m 左右位置出现缺陷反射波,井间超高密度电阻率反演成果图同样在深度处出现低阻值异常,结合两种检测资料,井间超高密度电阻率成像在一定程度上也能反应桩身内部的缺陷信息。

后期地铁公司根据物探成果,变更设计方案,盾构顺利穿越该构筑物。

已经建立的单桩、长短桩和群桩数值模型,分析电阻率分布情况,等值线走势形态。在进行剖面解释时参考检测孔资料,总结电阻率与地层之间的关联性,以检测孔周围 3~5 m 为参考值,追踪剖面电阻率等值线,达到整个剖面地质解译的目的^[18]。

3.1 实例 1

在江苏省某地地铁盾构施工时,穿越既有高层构筑物,其中构筑物有一根桩基础位于地铁盾构区间。构筑物基础平台下采用沉管灌注桩,因构筑物建成年代久远,档案资料不全,未能获得其下部基桩埋深信息,地面测量桩径约为 1 m。

由于基桩位于既有构筑物平台下部,无法采用高应变、钻芯法以及声波法测桩。在场地内部先对该桩进行了低应变测试,图 2 为该桩低应变测试结果。测试结果显示在 2.0 m 处存在缺陷反射波,但是低应变图像无法显示出桩底反射波,因此未能获得桩的实际埋深。

常规基桩检测方法无法对该场地桩埋深进行有效探测。综合分析场地条件,拟采用井间超高密度电阻率成像技术进行探测。在检测桩的两侧各 4.25 m 处布设钻孔 JK1 和 JK2,保证两检测孔和受检桩位于同一条剖面上,孔深 35 m,孔间距 8.5 m。本次工作参数:电极距 1.0 m,每条电缆电极数为 32 个,供电电压 90 V;采样时间 2 s。

3.2 实例 2

在江苏省某高层住宅楼建筑工地,由于场地内混凝土的实际灌注量和设计灌注量之间存在较大差异,建设单位对基桩施工质量存疑。如图 4 所示,场地内采用满堂布置的混凝土灌注桩基础,桩基础设计埋深 60 m(其中桩头 5 m),桩径 700 mm,桩间距为 2 m。

现场进行高、低应变测桩测试,测试结果显示低应变无桩底反射波,高应变试桩桩身出现了一定的破坏。由于设计桩长长、桩径小,在钻孔过程中及其容易出现偏钻,声波透射方法和钻芯法容易造成误判,未进行试验。

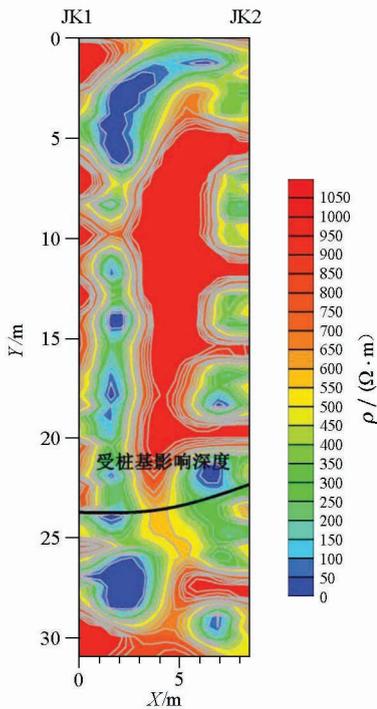


图3 场地1 井间超高密度电阻率反演成果
Fig. 3 Inversion results of ultra-high density resistivity between wells in site 1

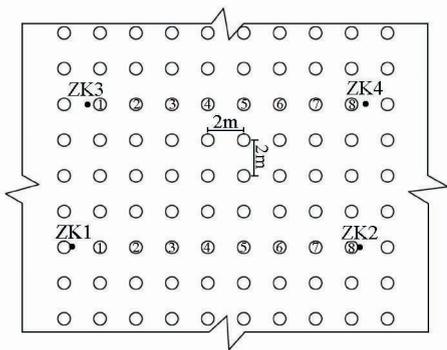


图4 场地2 井间超高密度电阻率检测孔平面位置示意
Fig. 4 Schematic diagram of the plane position of the ultra-high density resistivity borehole between wells in site 2

分别在场内预钻孔 ZK1、ZK2、ZK3 和 ZK4, 检测孔深度均 65 m, ZK1—ZK2 孔间距 16.5 m, ZK3—ZK4 孔间距 15.5 m。

由于探测深度较大,受到仪器本身局限(每根电缆有 32 根电极),为获得更高分辨率,采用电极间距为 1 m 的电缆进行测量,每一组井间超高密度电阻率探测均分为上、下两部分。每一组井间超高密度电阻率也按照上部、下部分别反演,然后拼接到一起。具体的外业工作方式是:ZK1—ZK2 井间超高密度电阻率测量,先将 ZK1 和 ZK2 内电缆最下面的电极放在 Y 轴 -61 m 处,测量 Y 方向 -61 ~ -30 m 范围的电阻率,再将 ZK1 和 ZK2 孔内电缆最下面电

极放到 Y 方向 -31 m 处,进行上部(-31~0 m)测量;同理,ZK3—ZK4 先测 Y 方向 -62.5 ~ -31.5 m 处的电阻率,再在 -31 ~ 0 m 处测量。本次工作参数:电极距 1.0 m,每条电缆电极数 32 个,供电电压 120 V,采样时间 2 s。

图 5 为 ZK1—ZK2 和 ZK3—ZK4 的井间超高密度电阻率反演成果,其中 ZK3—ZK4 剖面上,在 X 方向 3 m, Y 方向 -55 m 附近出现低阻异常,疑似出现了夹泥、缩颈或断桩等缺陷。对比图 1c 的群桩模型反演成果,获得了 2 组剖面间各 8 根桩的埋藏深度,统计于表 1。

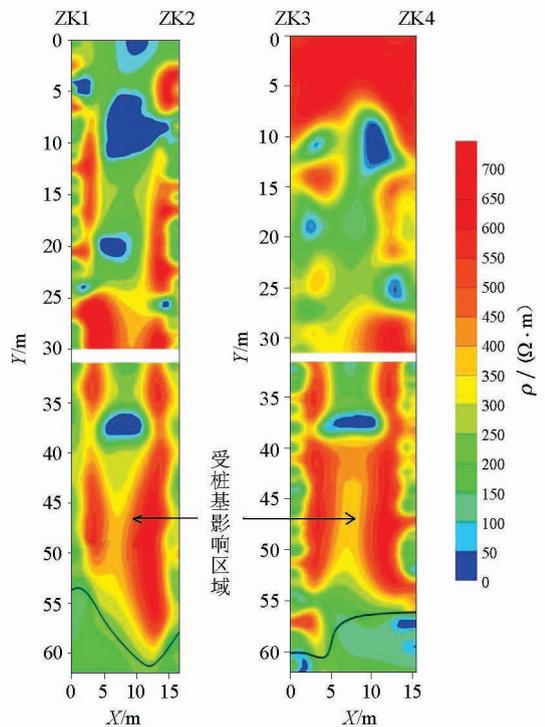


图5 井间超高密度电阻率反演成果
Fig. 5 The results of ultra-high density resistivity inversion between wells

表 1 检测孔之间的基桩埋藏深度
Table 1 The buried depth of pile foundation between boreholes

检测孔号	基桩编号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
ZK1—ZK2	52	55	57	58	59	60	59	57
ZK3—ZK4	60	60	59	57	56.5	56	56	56

本次获得了 16 根桩的埋藏深度,其中合格(埋深大于 60 m)桩有 3 根,检测合格率 18.75%,根据物探成果,建设单位在 ZK1 号孔右侧第一根桩进行了试桩,承载力不满足设计要求。后期,经过设计单位复算,在场地部分位置处进行了补桩,随后进行地基静载^[19]试验,试验合

格,承载力满足设计要求。

4 结论

1) 井间超高密度电法探测基桩,纵向分辨率相对较高,适用于桩身平面位置已知的前提下,利用该技术测定桩的埋深。

2) 该方法可以大规模检测基桩的长度,而不需要检测孔对应一根基桩。

3) 实例 2 中(图 5),ZK3—ZK4 反演剖面上出现低阻异常,疑似出现了夹泥、缩颈或断桩等缺陷,但无法进一步判断该位置处桩身具体出现何种缺陷。如何在井间超高密度电阻率成像基础上识别桩本身的缺陷,有待进一步研究。

4) 本次井间超高密度电阻率成像技术采用超高密度电法仪器,采集仪器的数据集成了大部分直流电法勘探装置,同时采用先进的 2.5 维反演技术,提高了勘探精度。但是仪器采集的数据量较大(每一组井间超高密度电阻率数据 6 万多个),对于无效信息的剔除以及干扰信息的识别较为困难,如何实现在原始数据上人为剔除干扰信息,有待进一步研究。

5) 常规桩埋深检测方法或多或少都有一定的局限性,特别是超长桩埋深检测,井间超高密度电阻率成像技术作为一种桩埋深检测的补充方法,值得推广应用。

参考文献 (References):

- [1] 龚晓南. 桩基工程手册. 第 2 版[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- Gong X N. Handbook of pile foundation engineering. 2nd Edition [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2016.
- [2] 赵振东, 杉本三千. 桩基低应变完整性检测的分析研究[J]. 地震工程与工程振动, 1995, 15(4): 104-112.
- Zhao Z D, Sugimoto S Q. Analysis and research on low strain integrity testing of pile foundation [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1995, 15(4): 104-112.
- [3] 蒋万里, 朱国甫, 张杰. 单桩承载力的一种直接动测法[J]. 岩土力学, 2020, 41(10): 3500-3508.
- Jiang W L, Zhu G F, Zhang J. A direct dynamic measurement method of single pile bearing capacity [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(10): 3500-3508.
- [4] 刘荻, 李贺. 物探检测方法在石拱桥病害整治工程中的应用[J]. 物探与化探, 2012, 20(5): 119-123.
- Liu D, Li H. Application of geophysical detection method in stone arch bridge disease remediation project [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 20(5): 119-123.
- [5] 李望明, 吴述来, 易强. 利用管波信息进行定量解释的方法

[J]. 物探与化探, 2017, 41(2): 311-315.

Li W M, Wu S L, Yi Q. Methods for quantitative interpretation using tube wave information [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(2): 311-315.

- [6] 陈亚东, 陈思, 于艳. 长短桩组合桩基宏观工作性状研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(3): 700-705.
- Chen Y D, Chen S, Yu Y. Study on the macro and meso working behaviors of the combined pile foundation with long and short piles [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(3): 700-705.
- [7] Zhe J, Greenhalgh S, Marescot L. Multichannel, full waveform and flexible electrode combination resistivity-imaging system [J]. Geophysics, 2007, 72(2): 592-603.
- [8] 柴伦炜, 汤国毅, 王国群, 等. 超高密度跨孔电阻率法成像在灌注桩埋深探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(2): 252-256.
- Chai L W, Tang G Y, Wang G Q, et al. The application of ultra-high-density cross-hole resistivity imaging in the buried depth detection of cast-in-place piles [J]. Journal of Engineering Geophysics, 2021, 18(2): 252-256.
- [9] Zhe J, Greenhalgh S A. A new kinematic method for mapping seismic reflectors [J]. Geophysics, 2010, 64(5): 1594-1602.
- [10] Zhe J, Greenhalgh S A. Prestack multicomponent migration [J]. Geophysics, 1997, 62(2): 598-613.
- [11] 苏宝, 刘晓丽, 卫晓波, 等. 井间超高密度电阻率法溶洞探测研究[J]. 物探与化探, 2021, 45(5): 1354-1358.
- Su B, Liu X L, Wei X B, et al. Detection of caves by ultra-high density resistivity method between wells [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(5): 1354-1358.
- [12] 张敬一, 陈智芳. 旁孔透射波法确定桩底深度方法对比研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(5): 1331-1337.
- Zhang J Y, Chen Z F. Comparative study on the method of determining the depth of pile bottom by side hole transmission wave method [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(5): 1331-1337.
- [13] 胡富彭, 欧元超, 付茂如. 不同充填介质下的溶洞跨孔电阻率 CT 探查数值模拟[J]. 中国岩溶, 2019, 38(5): 766-773.
- Hu F P, Ou C C, Fu M R. Numerical simulation of CT exploration of karst cave cross-hole resistivity under different filling media [J]. China Karst, 2019, 38(5): 766-773.
- [14] 周峰, 屈伟, 陈杰. 岩溶地区端承桩复合桩基的工程实践[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(2): 489-495.
- Zhou F, Qu W, Chen J. Engineering practice of end-bearing pile composite pile foundation in karst area [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(2): 489-495.
- [15] 曹权, 项伟, 贾海梁, 等. 跨孔超高密度电阻率法在球状风化花岗岩体探测中的应用[J]. 工程地质学报, 2013(5): 60-65.
- Cao Q, Xiang W, Jia H L, et al. Application of cross-hole ultra-high density resistivity method in the detection of spherical weathered granite bodies [J]. Journal of Engineering Geology, 2013(5): 60-65.
- [16] 岳建华, 刘志新. 井—地三维电阻率成像技术[J]. 地球物理学进展, 2005(2): 407-411.

- Yue J H, Liu Z X. Well-ground three-dimensional resistivity imaging technology [J]. Progress in Geophysics, 2005(2): 407 - 411.
- [17] 巩天才, 杨强, 黄木田, 等. 连拱隧道施工工序对既有建筑桩基的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(4): 1172 - 1179.
- Gong T C, Yang Q, Huang M T, et al. Analysis of the influence of the construction process of the double-arch tunnel on the pile foundation of the existing building [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(4): 1172 - 1179.
- [18] 张文俊, 李术才, 苏茂鑫, 等. 基于井间电阻率成像的城市地铁溶洞探测方法[J]. 山东大学学报: 工学版, 2014, 44(3): 75 - 82.
- Zhang W J, Li S C, Su M X, et al. Urban subway cave detection method based on cross-well resistivity imaging [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science Edition, 2014, 44(3): 75 - 82.
- [19] 黄新民. 盾构隧道下穿既有桥桩工程的保护方案研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(3): 557 - 561, 636.
- Huang X M. Study on the protection scheme of the shield tunnel underneath the existing bridge piles [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(3): 557 - 561, 636.

A simulation and application of cross-well ultra-high-density resistivity imaging in the detection of foundation piles

CHAI Lun-Wei^{1,2}

(1. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China; 2. State Key Laboratory of Rail Transit Engineering Informatization, Xi'an 710043, China)

Abstract: To improve the detection level of foundation piles and reduce major potential safety hazards, this study established three geoelectric models corresponding to a single pile, long-short piles, and a pile group through the 2.5D forward and inverse numerical simulations using the cross-well ultra-high-density resistivity imaging technology and analyzed the response characteristics and regularity of these models. Given the complex detection environment of foundation piles, this study further expounded the application characteristics and effects of the technology by combining two cases for the detection of the burial depths of piles. The results are as follows. The cross-well ultra-high-density resistivity imaging technology enjoys the advantages of high precision and flexible and convenient construction when being applied to the detection of pile buried depth. It can detect the lengths of foundation piles on a large scale rather than detecting one foundation pile using one detection hole, thus greatly improving the detection level of the burial depths of foundation piles.

Key words: cross-well ultra-high-density resistivity imaging; pile foundation; pile buried depth; numerical simulation

(本文编辑:沈效群)