

磁测井法检测钢筋笼在黄土场地应用探讨

阮嘉斌, 王铁行, 赵再昆, 张 亮

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 磁测井法作为钢筋笼长度无损检测的有效方法, 在黄土场地的适用性尚未得到验证. 对磁测井法原理进行分析得到判断钢筋笼长度的方法并结合工程实例对黄土地区灌注桩钢筋笼进行检测, 发现曲线特征点不明显. 进一步对黄土-古土层磁场强度垂直分量进行检测分析原因. 采用不同的检测方式、桩-孔距离、检测速度对灌注桩钢筋笼长度进行检测. 研究表明: 曲线特征点不明显主要受黄土场地黄土-古土壤互层以及古土壤磁性较强的影响, 为克服此影响测得实际钢筋笼长度, 在黄土场地采用磁测井法检测钢筋笼长度时, 应遵循磁力传感器从下至上检测、桩-孔距离不大于 0.7 m、磁力传感器检测速度不大于 300 mm/s 的标准.

关键词: 钢筋笼长度; 磁测井法; 黄土场地; 磁场垂直分量

中图分类号: TU753.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)04-0563-08

Discussion on the application of magnetic logging method to detect steel reinforcement cage in loess site

RUAN Jiabin, WANG Tiehang, ZHAO Zaikun, ZHANG Liang

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: As an effective method for nondestructive testing of reinforcement cage length, the applicability of magnetic logging method in loess site has not been verified. In this paper, the principle of magnetic logging method is analyzed to get a method to judge the length of reinforcement cage, and combined with engineering examples to detect the reinforcement cage of cast-in piles in loess area, it is found that the characteristic points of the curve are not obvious. Further, the vertical component of magnetic field intensity in loess-paleosol layer is detected and analyzed. Different detection methods, pile-hole distance and detection speed are used to detect the length of reinforced cage of cast-in-place piles. The results indicate that the unclear characteristic points of the curve are mainly affected by the interlayer of loess paleosol and the strong magnetic properties of paleosol in the loess site. In order to overcome this influence, the actual length of the reinforcement cage should be measured by the magnetic logging method in the loess site, the magnetic sensor should be detected from bottom to top, the pile-hole distance should not be more than 0.7 m, and the detection speed of the magnetic sensor should not be more than 300 mm/s.

Key words: reinforcement cage length; magnetic logging method; loess site; vertical component of magnetic field

随着我国社会化进程的加快, 黄土地区的中高层建筑、大跨度厂房和桥梁等大型建筑建设项目蓬勃发展^[1-5]. 桩基础因其良好的承载性能, 已成为黄土地区大型建设项目中最常用的基础形式之一^[6-10]. 灌注桩是一种现场成孔并在孔中放置钢筋笼浇筑混凝土而形成的基础. 桩中的钢筋笼具有抵抗弯矩、抗拉、抵抗水平荷载、抵抗地震等作用, 因此, 钢筋笼对桩基础的受力性能有很大

的影响, 若灌注桩本身的钢筋笼长度未达到设计要求, 会影响其承载性能, 对建筑物造成较大的安全隐患^[11-13]. 同时, 灌注桩钢筋笼的施工过程较隐蔽, 浇筑成桩后钢筋笼长度是否满足设计要求很难得到验证, 破桩开挖检查不仅耗费人力物力, 也会影响工程进度. 因此, 为保证建筑项目的安全, 需确保钢筋笼长度满足设计要求, 对于钢筋笼长度的检测工作是十分必要的.

曾采芹^[14]将磁测井法应用于寻找深层矿体与深部盲矿体并取得较好成果,带来了一定的经济收益.随着桩基的质量监管程序不断完善,产生了对浇筑后灌注桩钢筋笼长度检测的新要求,磁测井法在灌注桩无损检测得到应用.吴宝杰等^[15]采用磁测井法和旁孔透射波法检测灌注桩钢筋笼长度并进行对比,确保磁测井法的准确性.吴发荣等^[16]采用磁测井法对建筑物桩长进行探测,可快速探测各类带钢筋笼的灌注桩.伍卓鹤等^[17]根据数值模拟研究钢筋笼磁场垂向空间分布,并通过模型桩试验和现场工程桩试验验证磁测井法的可靠性.朱自强^[18]将磁测井法应用于实际工程项目中,检测结果与实际结果契合度较高,认为磁测井法可以在工程中推广.朱正^[19]系统地研究了磁测井法在检测钢筋笼方面的应用,认为磁测井法可作为判断钢筋笼长度的重要手段.磁测井法检测钢筋笼长度的正确性已经在许多地区得到验证.然而尚未见磁测井法在黄土地区应用的相关报道.黄土属于典型风成沉积物,尤其第四纪黄土的磁化率相较于之前显著提高^[20-22],由于不同地层铁磁性物质的含量差别较大,甚至形成黄土-古土壤互层,如典型的“红三条”,导致黄土地层背景场的磁性变化十分复杂.磁测井法检测钢筋笼长度在黄土场地的可行性尚未得到证实.

为验证磁测井法检测钢筋笼长度在黄土场地的适用性,本文对磁测井法原理进行介绍得到判断钢筋笼长度的方法.结合咸阳某旱塬的工程桩实例,采用磁测井法检测其场地钻孔灌注桩基础钢筋笼长度,对黄土-古土壤场地背景场磁性进行检测,对黄土场地信号杂乱的原因进行分析.同时采用不同的测试方式、桩-孔距离、传感器检测速度等得到适用于黄土场地的磁测井法检测标准,为磁测井法在黄土场地的应用与推广提供参考依据.

1 磁测井法检测原理

根据磁化率^[23],地球上的物质分为铁磁性物质、顺磁性物质和弱磁性物质.顺磁性物质与弱磁性物质在地球磁场影响下,内部原子磁矩运动杂乱无序,宏观上不表现出磁性.然而,当存在外加磁场时,其内部原子磁矩会发生固有转向向外排列,外部磁场越强,其对外所表现的磁性越强.桩周土以及桩身混凝土就属于此类物质.

而钢筋笼属于铁磁性物质,很容易就能够达到饱和状态.在地磁场的影响下,钢筋笼会平行

分布产生一个与地磁场方向一致的感应磁场.磁场在钢筋笼焊接、箍筋等局部位置产生不一样的磁力从而出现磁异常的极值.磁测井法的原理就是利用磁力传感器在桩周围钻孔来对桩身磁场强度进行检测,通过明显的磁性差异来判断钢筋笼的长度是否满足设计要求.原理示意图如图1所示.

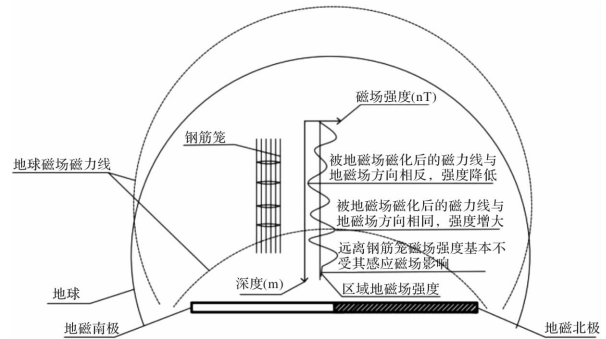


图1 磁测井法基本原理图

Fig. 1 Basic principle diagram of magnetic logging method

钢筋笼在地磁场作用下能够达到磁化饱和状态,而剩余磁性因无法被地磁场抵消,将其视为由无数多个 $\vec{M}dv$ 组成的元磁体,则该磁体的磁位表达式为

$$U = \frac{1}{4\pi} \iiint_v \frac{\vec{M} \cdot \vec{r}}{r^3} dv = \frac{M}{4\pi} \iiint_v \frac{\cos\theta}{r^2} dv \quad (1)$$

式中, M 表示矢径和磁化强度间的夹角,夹角公式为

$$\cos\theta = \cos(M, x)\cos(r, x) + \cos(M, y)\cos(r, y) + \cos(M, z)\cos(r, z) \quad (2)$$

式中:

$$M_x = M\cos(M, x), M_y = M\cos(M, y);$$

$$M_z = M\cos(M, z), \cos(r, x) = (x - \xi)/r;$$

$$\cos(r, y) = (y - \eta)/r, \cos(r, z) = (z - \zeta)/r;$$

$$r = [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z - \zeta)^2]^{1/2}$$

(3)

且 (x, y, z) 表示所检测的点的坐标, (ξ, η, ζ) 表示 dv 的坐标,磁测井法只考虑磁场的垂向强度,将钢筋笼视为均匀的磁化体,其垂向强度表达式为

$$Z_{\perp} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \begin{aligned} &M_x \iiint_v \frac{3(x - \xi)(z - \zeta)}{r^5} dv + \\ &M_y \iiint_v \frac{3(y - \eta)(z - \zeta)}{r^5} dv + \\ &M_z \iiint_v \frac{2(z - \zeta)^2 - (y - \eta)^2 - (x - \xi)^2}{r^5} dv \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

为简化计算过程,将钢筋笼简化为单根钢筋,沿 z 轴方向平行于钢筋笼进行磁场测试,则有

$$\xi = \eta = x = 0,$$

$$y = a(a \text{ 为桩-孔距离}),$$

$$r = [a^2 + (z - \zeta)^2]^{\frac{1}{2}},$$

$$M_x = M \cos i \sin A, M_y = M \cos i \cos A, M_z = M \sin i \quad (5)$$

式中: i 表示 \vec{M} 的磁向倾角; A 表示磁体走向与磁场北极的夹角,取 90° .令 $z - \zeta = t$,假定钢筋笼长度为 L ,则式(4)可表示为

$$Z_{\perp} = \frac{\mu_0 M \sin i}{4\pi a^2} \left[\frac{t}{(a^2 + t^2)^{\frac{1}{2}}} - \frac{t^3}{(a^2 + t^2)^{\frac{3}{2}}} \right]^{z-L} \quad (6)$$

将钢筋笼假定为长度为 L 的垂直铁棒,取极坐标系进行分析.如图2所示, P 点为空间当中的任意一点,假设 P 点磁荷为 m ,则钢筋笼在垂直断面上形成的感应磁场强度可由式(7)表示为

$$Z = 2m \left(\frac{1}{R_1} \cos \theta_1 - \frac{1}{R_2} \cos \theta_2 \right) \quad (7)$$

式中: R_1 与 R_2 表示点极到 P 点的距离; θ_1 和 θ_2 表示点极与垂向 H 的夹角.

根据感应磁场垂直分量梯度值确定钢筋笼长度时,当 L 足够长时, R_1 相较于 R_2 非常小,可忽略不计,则式(7)可简化为

$$Z = \frac{2m}{R_1} \cos \theta_1 \quad (8)$$

在过 O 点的垂向平面上,感应磁场强度表达式可表示为

$$Z = \frac{2mH}{H^2 + D^2} \quad (9)$$

式中: D 表示垂向剖面到钢筋笼中心的距离.则感应磁场垂直分量梯度为

$$\frac{dZ}{dH} = 2m \frac{D^2 - H^2}{(H^2 + D^2)^2} \quad (10)$$

由上述分析可知,可通过以下方法来判断钢筋笼长度:

(1)根据深度-垂直分量($H-Z$)曲线确定:取深度-垂直分量($H-Z$)曲线下部小于背景场转成大于背景场的拐点对应的深度位置;

(2)根据深度-磁场垂直分量梯度($H - \frac{dZ}{dH}$)曲线确定时,取深度-磁场垂直分量梯度($H - \frac{dZ}{dH}$)曲线下部明显极值点所对应的深度位置;

(3)深度-磁场垂直分量($H-Z$)曲线转变为土层背景场曲线的位置.

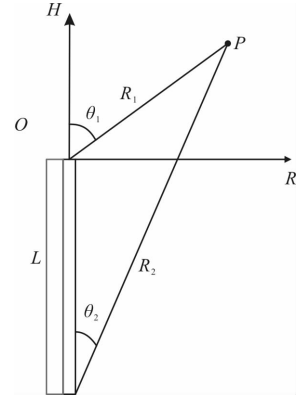


图2 极坐标示意图

Fig. 2 Polar coordinate schematic diagram

2 现场检测及分析

为研究磁测井法检测钢筋笼长度在黄土地地的可行性,本次试验对咸阳某场地的多根钻孔灌注桩钢筋笼采用磁测井法进行了长度检测,本次检测采用的是由武汉中岩生产的RSM-RLT(A)钢筋笼长度测试仪.为保证检测结果的正确性,在检测开始前对仪器的准确度进行了校对,本次检测测试精度为0.1 m.在进行检测前需要在桩外侧边缘钻孔且孔桩距离沿桩的纵向方向保持基本不变.为区分背景场与钢筋笼磁场强度差异,检测钻孔深度宜大于钢筋笼底设计深度5 m,依据现场环境及条件,本次测试钻孔深分别为38、39 m.同时,为防止塌孔埋管以及缩孔导致检测无法正常进行,在钻孔完成后尽快在其中放置PVC管.现场检测示意图如图3所示.

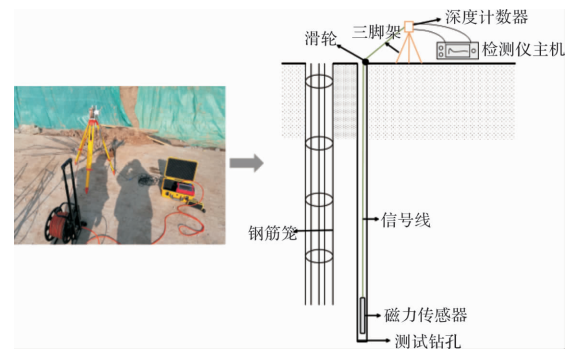


图3 现场测试示意图

Fig. 3 Field test diagram

本次检测场地地处我国黄土高原的中南部,从区域地貌上来看其属于陇东黄土高原的一部分,属于典型的黄土地.该场地地基基础设计等级为甲级.灌注桩主筋采用HRB400级钢筋,箍筋采用HPB300级钢筋.主筋配筋采用16Φ18,基底以下10 m深度范围内采用螺旋箍筋φ10@300,10~14 m深度范围内采用螺旋箍筋φ10@200,14 m深度以下范围采用螺旋箍筋φ10@300,加劲箍筋

采用 $\Phi 18@2000$, 桩长 33 m, 基底以下设计钢筋长度为 32.9 m. 本次试验采用的是武汉中岩生产的 RSM-RLT(A) 钢筋笼长度测试仪, 依据上述方法判定灌注桩中钢筋笼长度时, 试验仪器绝对误差小于 1 m, 现场施工误差小于 0.5 m, 则取总误差范围为 ± 1.5 m. 现场检测结果曲线如图 4 所示.

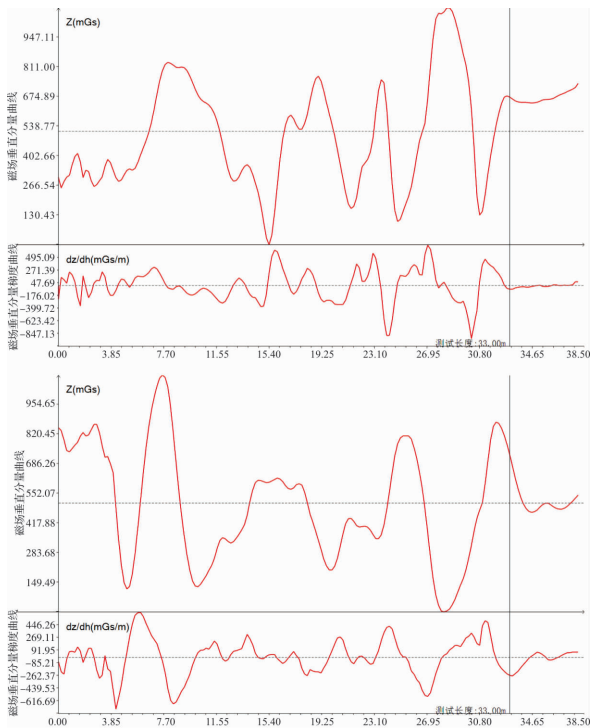


图 4 检测结果典型图

Fig. 4 Typical diagram of test results

由图 4 深度-磁场垂直分量 ($H-Z$) 曲线可知, 当传感器位于钢筋笼底部以下位置时, 钢筋笼产生的感应磁场对传感器检测到的磁场垂直分量几乎没有影响, 其代表的强度主要是桩周土的磁场垂直分量, 其作为背景场磁场强度的变化表现得相对比较稳定. 当传感器经过钢筋笼时, 钢筋笼产生的感应磁场被传感器检测到, 所检测的钢筋笼的端部磁场垂直分量曲线变化特征十分明显, 钢筋笼的磁场垂直分量变化范围较大. 同时, 通过对深度-磁场垂直分量梯度 ($H - \frac{dZ}{dH}$) 的分析可以发现, 可取其极小值点作为钢筋笼底端位置. 由上述分析可知, 通过两个曲线确定的灌注桩钢筋笼长度的结果较一致, 钢筋笼的测试长度均为 33 m, 其检测结果均在允许误差范围内, 检测结果表明钢筋笼长度符合设计要求. 同时, 从图 4 可知, 采用磁测井法检测钢筋笼长度在黄土场地所检测到的钢筋笼磁场垂直分量信号图特征点不明显. 这可能与黄土场地磁性较强有关. 为分析检测曲线杂乱的原因. 在该场地钻孔对该场地的黄

土-古土壤层磁场强度垂直分量进行检测. 为保证测试结果的准确性, 对黄土古土壤磁场垂直分量进行多次检测, 典型测试结果图如图 5 所示.

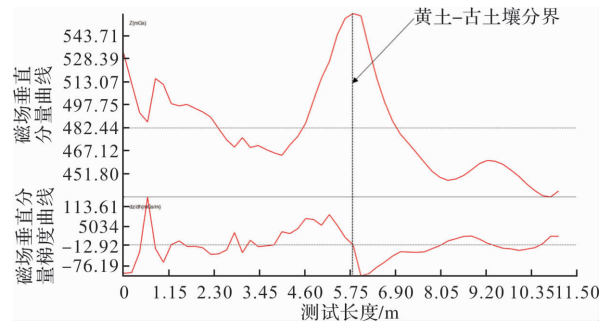


图 5 黄土场地磁场垂直分量信号图

Fig. 5 Vertical component signal diagram of magnetic field in loess field

从图 5 可知, 该场地背景场保持在 482.44 mGs 左右浮动, 从对黄土古土壤场地磁场垂直分量进行检测可以看出黄土场地的感应磁场强度较大. 黄土磁性较大的原因为中国黄土位于半干旱地区, 其蒸发量大于降水量, 该场地土壤长期处于通气透水状态, 该环境有利于强磁性矿物的生成. 同时从图 6 中可以看出在黄土-古土壤分界处磁感应强度垂向分量变化明显, 峰值出现, 大小为 565.62 mGs. 造成该现象的原因是在中国黄土地区成土过程中为黄土的磁性提供载体的主要矿物为磁铁矿、磁赤铁矿等强磁性矿物. 土体中还有大量具有还原性的有机物质, 会形成一个一定大小的还原区域, 部分三价铁会因此还原为二价铁, 磁赤铁矿转化为磁铁矿. 因此, 磁铁矿是黄土场地最主要的载磁矿物. 磁铁矿按其粒径大小分为超顺磁颗粒 (SP), 粒径小于 $0.03 \mu\text{m}$; 稳定单畴颗粒 (SSD), 粒径介于 $0.03 \sim 0.1 \mu\text{m}$; 假单畴颗粒 (PSD), 粒径介于 $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$; 多畴颗粒 (MD), 粒径大于 $10 \mu\text{m}$, 各粒子粒径大小及磁化率大小比较示意图如图 6 所示.

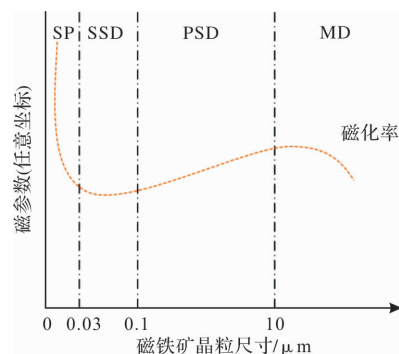


图 6 不同磁畴的磁化率变化

Fig. 6 The change of magnetic susceptibility of different magnetic domains

其中,超顺磁颗粒(SP)与稳定单畴颗粒(SSD)在磁性增强方面起主要作用.黄土地区成土作用较强,成土作用越强,SP与SSD颗粒的含量越高,土体磁性越强.一般情况下,古土壤的成土作用要强于黄土,因此,古土壤中的SP与SSD颗粒含量明显高于黄土层,约为黄土的3~4倍且黄土中磁性物质的平均粒径大于古土壤,同时,古土壤在成土过程中形成的较小的PSD颗粒对古土壤磁性的增强也起到了重要作用,磁性矿物粒径的分布结果是古土壤磁性较强的主要原因.因此,传感器在到达古土壤层时磁场强度突然增大,导致磁场垂直分量黄土-古土壤分界处磁感应强度垂向分量增大.

通过上述分析可知,在黄土地使用磁测井法检测钢筋笼长度时检测曲线特征点不明显,这是由于黄土-古土壤互层且古土壤磁性较强导致.为进一步探讨磁测井法检测钢筋笼长度在黄土地的应用,克服背景场影响测得实际钢筋笼长度,本文通过对磁测井法的各个影响因素进行分析,得到适用于黄土地磁测井法检测标准.

3 影响因素分析

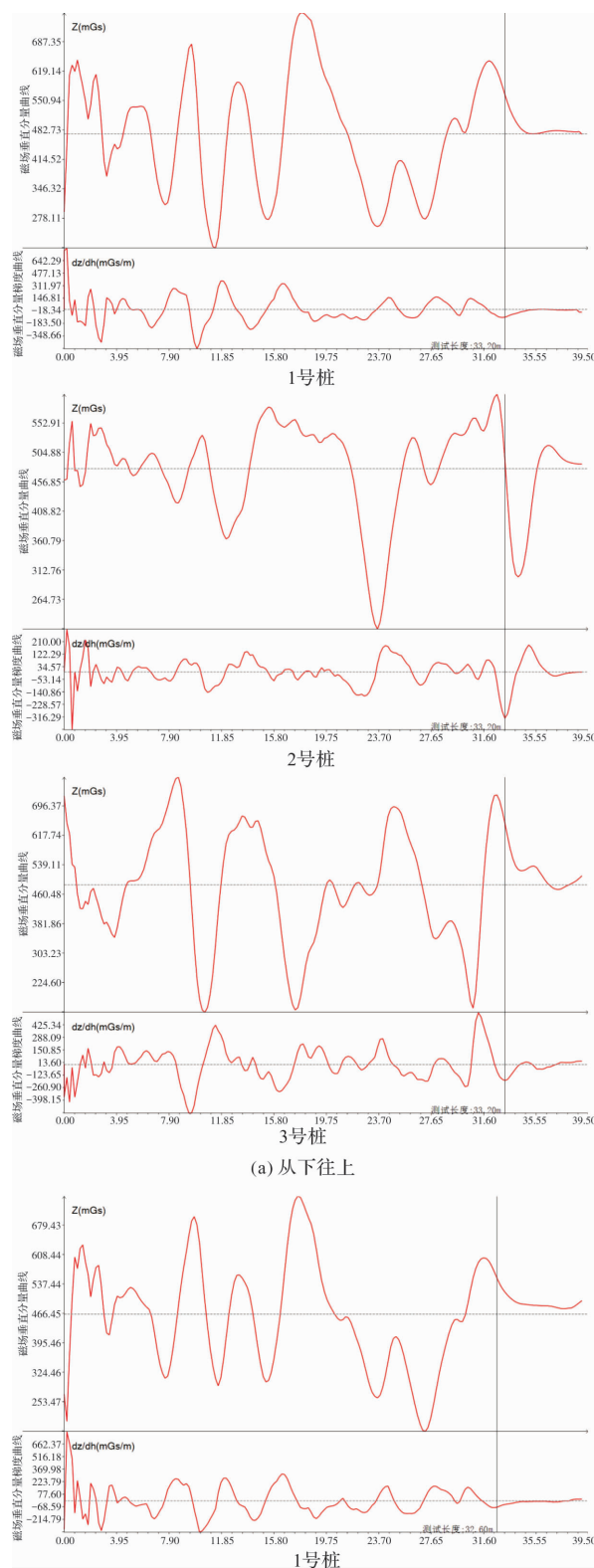
3.1 测试方式

常用的磁测井法检测钢筋笼长度有两种测试方式,即传感器从下往上检测和从上往下检测.为验证两种不同测试方式在黄土地适用性并保证试验结果的准确性,依据《建筑基桩检测技术规范》(JGJ—2014)^[24],为保证试验结果的可靠性,本次现场桩基检测数量不少于总数量的10%.因此,为保证结果的可靠性,本次现场试验分别采用传感器从下往上和从上往下两种方式对3根桩的钢筋笼长度进行检测,即1~3号桩,钢筋笼检测信号如图7所示.

由图7可知,分别采用从下往上和从上往下两种测试方式时,所检测的1号桩钢筋笼磁场垂直分量峰值分别为768.34、755.61 mGs,检测长度分别为33.20、32.60 m.2号桩钢筋笼磁场垂直分量峰值分别为635.32、655.21 mGs,检测长度分别为33.20、33.40 m.3号桩钢筋笼磁场垂直分量峰值分别为755.68、769.26 mGs,检测长度分别为33.20、33.00 m.根据上述测试结果可知,在采用不同的测试方式的情况下,3根桩的磁场强度垂直分量峰值大小接近且钢筋笼长度检测结果接近,均在允许误差范围内.

同时,从图7可以看出,采用传感器从下往上

和从上往下两种测量方式所测得的磁场强度垂向分量信号图像基本一致.通过对两种测试方式结果的比较以及上述分析可知,采用磁测井法在黄土地检测钢筋笼长度时采用从下往上和从上往下两种测试方式均可对钢筋笼长度进行准确的检测.在实际试验中,磁力传感器从上至下检测时,其稳定性较差.通过对比分析发现,磁力传感器从下至上的检测方式更为适用.



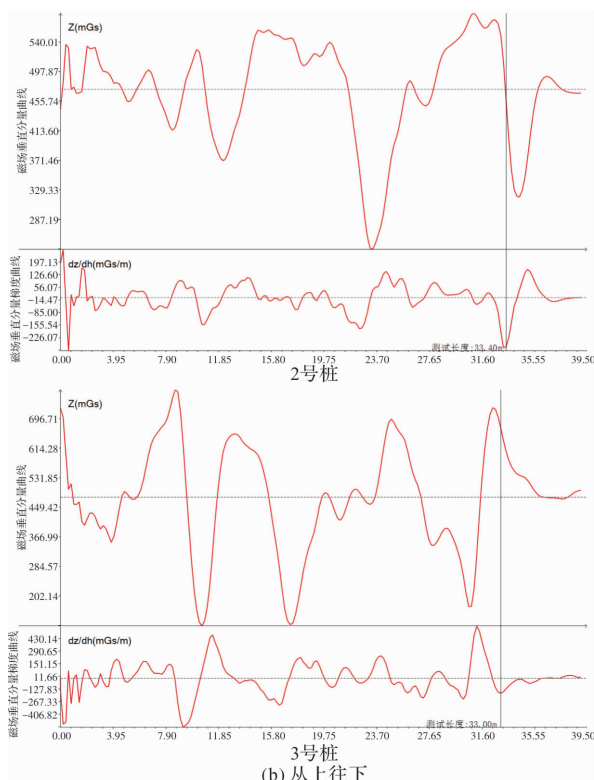


图7 不同测试方式下钢筋笼测试信号

Fig. 7 Test signals of steel cage under different test methods

3.2 桩-孔距离

为研究适用于黄土场地的磁测井法检测钢筋笼长度的桩-孔距离,对1~3号桩分别采用了0.1~1.0 m共10种不同的桩-孔距离进行检测。不同桩-孔距离下磁场强度垂向分量峰值如图8所示。

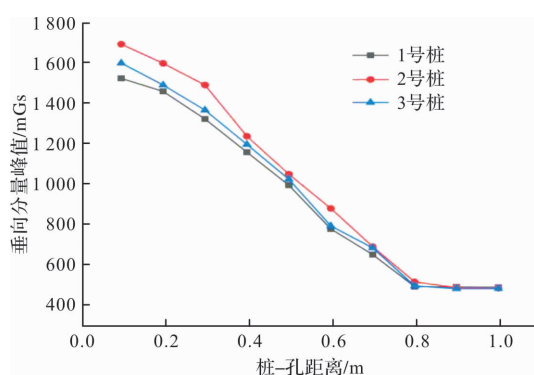


图8 不同桩-孔距离下磁场垂向分量峰值

Fig. 8 The peak value of vertical component of magnetic field under different pile-hole distances

为研究适用于黄土场地的磁测井法检测钢筋笼长度的桩-孔距离,对1~3号桩分别采用了0.1~1.0 m共10种不同的桩-孔距离。为保证检测结果的准确性并防止测试结果的偶然性,进行多次检测,取平均值作为最终结果。不同桩-孔距离下磁场强度垂向分量峰值如图8所示。

由图8可知,1~3号桩的磁场强度垂直分量峰值的大小均随着桩-孔距离的增大而逐渐减小。同时,桩-孔距离大于等于0.8 m时,磁场的垂向分量峰值基本没有发生变化,此时的磁场强度垂直分量峰值与黄土-古土壤背景场大小接近,传感器测试到的磁场强度垂直分量基本是由土层所提供。此时通过曲线较难准确判断钢筋笼长度。当桩-孔距离为0.1~0.7 m时,此时所检测到的磁场强度垂直分量主要为钢筋笼感应磁场的强度,背景场明显,可以判断出钢筋笼长度。桩-孔距离分别为0.1~0.7 m时的钢筋笼检测长度如图9所示。

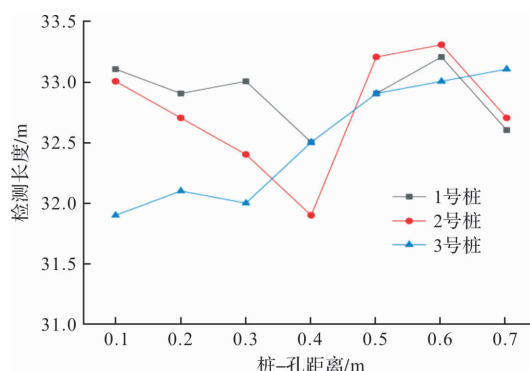


图9 不同桩-孔距离下钢筋笼检测长度

Fig. 9 Detection length of reinforcement cage under different pile-hole distances

由图9可知,当桩-孔距离为0.1~0.7 m时,检测所得的钢筋笼长度范围为31.9~33.3 m,检测结果相差较小且均在允许误差范围内。通过上述分析可知,在黄土场地采用磁测井法检测钢筋笼长度时,桩-孔距离应不大于0.7 m。

3.3 传感器检测速度

在检测钢筋笼长度时,传感器的检测速度对最终结果也有一定的影响,为探讨适用于黄土场地的传感器检测速度,本次检测采用50~400 mm/s共八种提升速度对1~3号桩的钢筋笼长度进行检测。不同检测速度下检测结果的磁场垂向分量峰值如图10所示。

由图10可知,当传感器检测速度达到350 mm/s时,磁场垂直分量峰值减小幅度过大,但此时的磁场强度垂直分量仍与背景场有较大的差距。当提升速度达到400 mm/s时,磁场强度垂直分量峰值减小到与黄土古土壤的背景场大小接近,造成此现象是由于提升速度过快,传感器捕捉到的钢筋笼磁场感应强度不完整,捕捉到的均为黄土古土壤磁场强度,导致磁场垂直分量峰值变小。当提升速度分别为50~350 mm/s时,3根

桩钢筋笼检测长度平均值如图 11 所示。

由图 11 可知,在提升速率为 $50 \sim 350 \text{ mm/s}$ 时,3 根桩检测所得的钢筋笼长度范围为 $31.9 \sim 33.1 \text{ m}$,钢筋笼长度的检测结果相差较小且均在误差范围内。通过上述分析可知,在黄土地采用磁测井法检测钢筋笼长度时,提升速度应不大于 350 mm/s 。

通过上述研究可知,在黄土地采用磁测井法检测钢筋笼长度时,应遵循以下标准:磁力传感器从下至上检测、桩-孔距离不大于 0.7 m 、磁力传感器检测速度不大于 300 mm/s 。研究结果为之磁测井法检测钢筋笼长度在黄土地的应用拓展提供了参考依据。

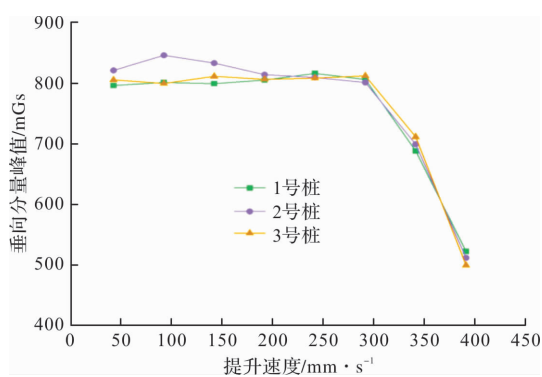


图 10 不同提升速度下磁场垂向分量峰值

Fig. 10 The peak value of the vertical component of the magnetic field at different lifting speeds

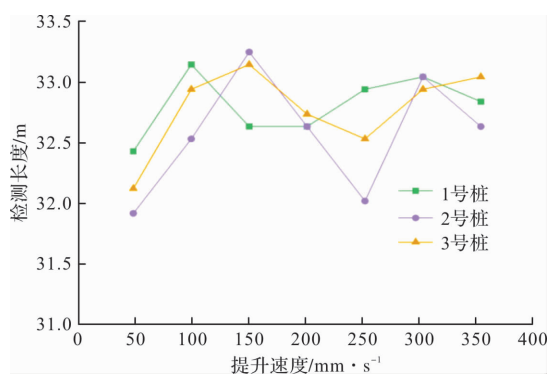


图 11 不同提升速度下钢筋笼检测长度

Fig. 11 Detection length of reinforcement cage under different lifting speeds

4 结论

(1)检测曲线特征点不明显主要受黄土地黄土-古土壤互层以及古土壤磁性较强的影响;

(2)在黄土地采用磁测井法检测钢筋笼长度时,应遵循以下标准:磁力传感器从下至上检测、桩-孔距离不大于 0.7 m 、磁力传感器检测速度不大于 300 mm/s 。

参考文献 References

- [1] 马逸敏,马宏伟,翁益显,等. 中心支撑-钢框架高层公寓的结构分析及优化研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2022, 54(4): 606-616.
MA Yimin, MA Hongwei, WENG Yixian, et al. Structural analysis and optimization of high-rise apartments with concentrically braced steel frame[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2022, 54(4): 606-616.
- [2] 刘俊,王建强,范力,等. 大跨度吊车梁托柱支承屋盖系统的破坏机理分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2023, 55(4): 607-615.
LIU Jun, WANG Jianqiang, FAN Li, et al. Failure mechanism analysis of roof system supported by columns on large-span crane girders[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2023, 55(4): 607-615.
- [3] HE Y C, LIN H B, FU J Y, et al. Dependence of wind load on air density for highrise buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021, 211: 104558.
- [4] GOU H, LIU C, ZHOU W, et al. Dynamic responses of a high-speed train passing a deformed bridge using a vehicle-track-bridge coupled model[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2021, 235 (4): 463-477.
- [5] 李越,阮欣,张少锦. 亚热带湿热环境桥梁混凝土锚碇碳化细观研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2023, 55(4): 504-514.
LI Yue, RUAN Xin, ZHANG Shaojin. Mesoscopic study on carbonation of bridge concrete anchorage in subtropical humid environment[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2023, 55 (4): 504-514.
- [6] 杨新文,张海龙,罗扬,等. 挤密桩预处理后黄土地基灌注桩承载特性[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(4): 485-492.
YANG Xinwen, ZHANG Hailong, LUO Yang, et al. Bearing characteristics of cast-in-place pile in loess foundation after compacted pile pretreatment. [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2021, 53(4): 485-492.
- [7] 吴军,万再新,沈大庆,等. 基于有限差分的银川地区大直径灌注桩承载性状研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(4): 545-551.
WU Jun, WAN Zaixin, SHEN Daqing, et al. Study on bearing behavior of large diameter bored piles in Yinchuan area based on finite difference[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition),

- 2021, 53(4): 545-551.
- [8] ZHAO N, WU H, SONG Y, et al. Calculation of negative frictional resistance of foundation pile in deep fill foundation[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021: 1-8.
- [9] PAN G, LIU X, YUAN S, et al. A field study on the arching behavior of a geogrid-reinforced floating pile-supported embankment[J]. Transportation Geotechnics, 2022, 37: 100795.
- [10] 张磊, 罗少锋, 鲁洁. 湿陷性黄土地地竖向承载灌注桩浸水试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(4): 532-537.
- ZHANG Lei, LUO Shaofeng, LU Jie. Immersion tests on vertically loaded cast-in-place piles in collapsible loess[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2019, 51(4): 532-537.
- [11] WANG H, GAN G, ZENG K, et al. Study on flexural performance of prestressed concrete steel strand square piles with reinforcement[J]. Buildings, 2022, 12(11): 1801.
- [12] 刘畅, 刘彦坡, 郑刚, 等. 软土地区钻孔灌注桩抗震性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(2): 360-369.
- LIU Chang, LIU Yanpo, ZHENG Gang, et al. Experimental study on seismic behavior of bored cast-in-situ pile in soft soil area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(2): 360-369.
- [13] KIM S, WHANG S W, KIM S. Pile foundation design through the increased bearing capacity of extended end pile[J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2017, 16(2): 395-402.
- [14] 曾采芹. 磁测井在找深部矿的应用实例[J]. 地质与勘探, 1986(9): 46-49.
- ZENG Caiqin. Application example of magnetic logging in deep mine exploration[J]. Geology and Exploration, 1986(9): 46-49.
- [15] 吴宝杰, 姬美秀, 杨桦, 等. 灌注桩钢筋笼长度及长桩桩长无损检测技术研究[J]. 工程地球物理学报, 2012, 9(3): 371-374.
- WU Baojie, JI Meixiu, YANG Hua, et al. Research on nondestructive detection technology of reinforcement cage length pile length in cast-in-situ pile[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2012, 9(3): 371-374.
- [16] 吴发荣, 楼凯峰. 磁测井法在既有建(构)筑物桩长探测中的应用[J]. 工程技术研究, 2022, 7(22): 33-35.
- WU Farong, LOU Kaifeng. The application of magnetic well logging method in pile length detection of existing structures (Buildings)[J]. Engineering and Technological Research, 2022, 7(22): 33-35.
- [17] 伍卓鹤, 张秀顺, 刘辉东, 等. 利用磁测井法检测灌注桩钢筋笼长度[J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(5): 693-699.
- WU Zhuohe, ZHANG Xiuxin, LIU Huidong, et al. Detecting the length of bored pile steel reinforcement cage by magnetic logging method[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013, 10(5): 693-699.
- [18] 朱自强. 磁测井法在桩基工程监管中的应用[J]. 工程质量, 2015, 33(7): 71-73.
- ZHU Ziqiang. Application of magnetic method in quality supervision of pile foundation engineering[J]. Construction Quality, 2015, 33(7): 71-73.
- [19] 朱正. 磁测井法检测钻孔灌注桩钢筋笼长度的应用与分析[J]. 土工基础, 2021, 35(2): 218-221.
- ZHU Zheng. Detection of bored pile by magnetic logging method[J]. Soil Engineering and Foundation, 2021, 35(2): 218-221.
- [20] 董志磊, 刘辉, 李鑫, 等. 黄土湿陷对预制管廊受力性能影响的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2023, 55(5): 704-711.
- DONG Zhilei, LIU Hui, LI Xin, et al. Experimental study on the influence of loess collapsibility on the mechanical performance of prefabricated pipe gallery[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2023, 55(5): 704-711.
- [21] ZAN J, FANG X, YAN M, et al. Comparison of hysteresis, thermomagnetic and low-temperature magnetic properties of particle-size fractions from loess and palaeosol samples in Central Asia and the Chinese Loess Plateau[J]. Geophysical Journal International, 2018, 214(3): 1608-1622.
- [22] LIU X, MAO X. Loess-palaeosol sequences in diverse environments: Aeolian accumulation identification and magnetic susceptibility models[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2021, 584: 110683.
- [23] 苏三庆, 刘馨为, 王威, 等. 磁记忆效应的 Jiles-Atherton 理论模型全过程推导[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2024, 56(1): 1-6.
- SU Sanqing, LIU Xinwei, WANG Wei, et al. Whole process derivation of Jiles-Atherton model for magnetic memory effect[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2024, 56(1): 1-6.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基桩检测技术规范: JGJ—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for testing of building foundation piles: JGJ—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.

(编辑 李睿奇)