

地质雷达在预应力梁钢绞线孔道注浆质量中的研究

化得钧¹,王齐仁¹,王坤²,黄玉凤¹,张建¹,邓国文¹

(1. 湖南科技大学土木学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 长安大学公路学院, 西安 710064)

摘要:预应力梁钢绞线孔道注浆饱满程度直接关系到桥梁的安全和使用寿命,对其施工工艺的控制和注浆效果的检测越来越受关注。运用时域有限差分法(FDTD),采用广义完全匹配层(GPML)作为吸收边界,对常见注浆孔道缺陷进行二维正演,结合工程开窗验证,总结缺陷的雷达图像特征和规律,为地质雷达法检测注浆饱满度提供依据。

关键词:预应力孔道;注浆质量;地质雷达;时域有限差分

中图分类号:TU47

文献标识码:A

预应力孔道注浆密实度问题是目前预应力混凝土结构桥梁工程中的质量通病。预应力孔道压浆质量若存在缺陷,桥梁结构中的预应力钢筋会出现锈蚀现象,当锈蚀到一定程度会造成预应力钢筋失效,导致结构承载力部分或全部失效,严重地威胁到桥梁的安全使用及其使用寿命。桥梁工程在预应力孔道注浆施工技术水平有待进一步完善,特别是孔道注浆质量的检测和评价方法,仍需加强理论和实践研究,以寻求合理有效的检测方法^[1-2]。

1 地质雷达工作原理

地质雷达是通过发射天线向介质发射宽频带短脉冲电磁(10 MHz~2.5 GHz),电磁波在介质中沿各方向传播,当遇到介电常数不同的分界面时,发生反射、透射和绕射^[3-4],由接收天线接收并记录反射回来的电磁波,如图1所示。

根据接收到电磁波的波形、振幅强度和时间的变化特征推断地下介质的空间位置、结构、形态和埋藏深度。

脉冲的双程走时为: $t = \frac{\sqrt{4H^2 + X^2}}{v_p}$, 对于雷达波

速 v_p , 可用 $v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$ 近似求解。雷达探测以位移电流为

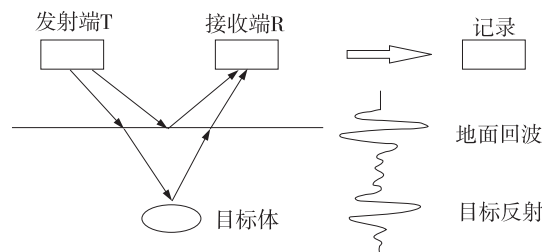


图1 地质雷达工作原理示意图

主,传导电流可以忽略,其反射系数为:

$$r = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (1)$$

式中: ϵ_1, ϵ_2 一界面上、下介质的相对介电常数。

通过式(1)可知,材料的相对介电常数差别很大时,当电磁波到达界面处会产生反射回波信号。根据水、空气、混凝土及钢筋的相对介电常数差异,如果预应力孔道注浆不饱满,存在空洞或积水等情况时会出现很强的反射信号。

2 雷达正演模拟

2.1 正演原理

在桥梁预应力波纹管注浆质量检测中,由于钢筋、注浆材料、梁板形状和尺寸等因素的影响,造成对雷达

收稿日期:2012-06-15

基金项目:湖南省教育厅项目(JB3040)

作者简介:化得钧(1987-),男,甘肃白银人,硕士生,主要从事地质资源与地质工程方面的研究,(E-mail)532596302@qq.com

图像的分析判断产生了很大的干扰。因此,需要对桥梁波纹管空洞进行 Matlab 数值模拟,认识其在雷达剖面中的图像特征,对实际探测具有较大的帮助,提高对数据解释的准确性。

麦克斯韦方程组(Maxwell Equations)概括了宏观电磁场理论的基本规律。时域有限差分法是从 Maxwell 两个旋度方程出发,建立计算时域电磁场的数值方法的思路,在无源区域,Maxwell 方程的两个旋度方程可表示为^[5]:

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} - \sigma_m H \quad (2)$$

$$\nabla \times H = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} + \sigma_e E \quad (3)$$

其中 E 为电场强度(V/m); H 为磁场强度(A/m); ε 为介电常数(F/m); μ 为磁导率(H/m); σ_m 为等效磁阻率(ω/m); σ_e 为电导率(S/m)。

在二维 TM 波情况下,运用 K. S. Yee 氏网格模型,利用中心差商,把连续变量离散化,把电场进行规约化,得出二维空间的时域有限差分方程,即地质雷达正演模拟方程:

$$H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}) = H_x^{n-\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}) - CD \cdot [E_z^n(i, j + 1) - E_z^n(i, j)] \quad (4)$$

$$H_x^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j) = H_x^{n-\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j) + CD \cdot [E_z^n(i + 1, j) - E_z^n(i, j)] \quad (5)$$

$$E_z^{n+1}(i, j) = CA(i, j) \cdot E_z^n(i, j) + CD \cdot CB(i, j) \cdot [H_y^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2}, j) + H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j - \frac{1}{2}) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2})] \quad (6)$$

其中系数分别为:

$$CA(i, j) = \frac{1 - \frac{\sigma(i, j)\Delta t}{2\varepsilon(i, j)}}{1 + \frac{\sigma(i, j)\Delta t}{2\varepsilon(i, j)}}$$

$$CD = \frac{\Delta t}{\Delta s} \cdot \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

$$CB(i, j) = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon(i, j) + \frac{\sigma(i, j)\Delta t}{2}}$$

TE 波的有限差分方程与 TM 波的相似,可利用对偶关系写出。

2.2 数值稳定性分析

Maxwell 旋度方程按 Yee 氏网格所导出的差分方程是一种显式差分格式,它的执行是按时间步长推进计算电磁场在空间内的变化规律。因此其稳定性条件就是要求时间步长不得大于电磁波传播的空间步长所需的时间,否则就破坏电磁波传播的因果关系,于是二维 TM 波的数值稳定性条件:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta s}{v_{\max} \sqrt{2}} \quad (7)$$

式中: Δt —时间变量步长; Δs —空间变量步长; v_{\max} —自由空间中电磁波的最大速度^[6]。

2.3 广义完全匹配层边界条件

W. C. Chew 和 W. Weedon 提出了通过将实坐标系转化为复坐标系来实现的广义完全匹配层(GPML)吸收边界,GPML 不仅能吸收行波,而且对于 PML 不吸收的消失波也有很好的吸收效果。GPML 与 PML 场分量分裂理论不同,在各项异性介质中和复空间中波方程仍为麦克斯韦方程,物理图像更加清晰,易于理解其物理实质,且编程和实现更加容易、效率高、计算速度快。

2.4 干扰波消减原理

干扰波消减原理的基本思路是,利用两组信号,一组中包含有效信号和干扰信号,另一组中只有干扰信号,通过将带有干扰信号的有效信号与干扰信号相减,而得到有效信号,或者包含一定干扰信号的有效信号的性质。理论方面,若两个干扰信号完全相同且同步,相减后,得到的只有有效信号;若两个干扰信号不完全相同但同步,相减后,得到的信号既包括有效信号也包括干扰信号,但信号中有效信号的占比将比相减前变大了。实际中,即或是两个完全相同的干扰信号,由于有效信号的作用,两个干扰信号也不同步了,只要两个干扰信号的偏差不大,且离有效信号较远,两组相减后,得到的信号为有效信号和干扰信号,有效信号将得到加强。

2.5 模型建立

正演模拟运用时域有限差分法(FDTD),采用广义完全匹配层(GPML)作为吸收边界的二维正演模型。模型为长 2.9 m,厚 0.5 m 的矩形混凝土,共分布有 14 根 8 mm 粗的钢筋,混凝土的相对介电常数 $\varepsilon_r = 6$,电导率 $\sigma = 0.01$ s/m,相对磁导率 $\mu_r = 1.0$;模型中设置了四束塑料波纹管,其中心部位设有直径 0.03 m 的钢绞线,

四束波纹管的中心水平位置分别为 0.6 m、1.2 m、1.8 m、2.4 m,圆心深度均为 0.3 m,内径为 0.1 m,管壁厚度为 0.002 m,介电常数 $\epsilon_r = 6.5$;四束波纹管中,前三束分别模拟了上圆形空洞、矩形空洞及右圆形空洞三种常见的空洞类型,第四束波纹管为注浆饱满。圆形空洞半径为 0.03 m;矩形空洞长为 0.08 m,宽为 0.03 m,模型几何剖面图如图 2 所示,正演模拟剖面图如图 3 所示,消去背景场模拟图如图 4 所示。

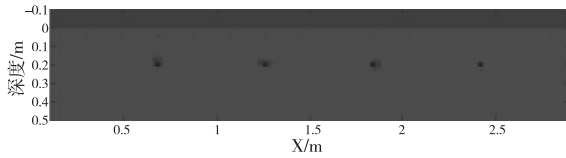


图 2 预应力钢绞线孔道模型剖面图

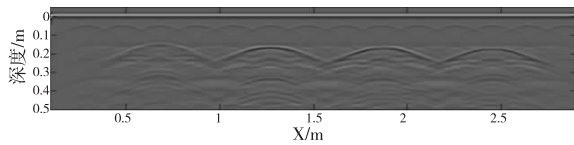


图 3 雷达正演模拟灰度图

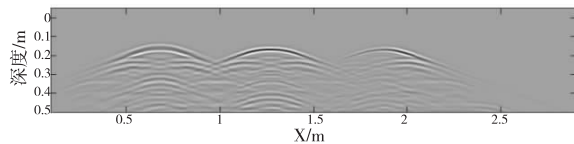


图 4 消去背景场正演模拟图

3 工程实例

3.1 工程概况

试验以大浏高速公路白石高架桥为依托,对桥梁预应力孔道进行注浆检测。白石高架桥预制 T 梁,中梁底座长 30.0 m,边梁梁底座长 30.2 m,宽 0.5 m,高 2 m。预应力钢绞线孔道采用内径 0.1 m 的 PVC 塑料管,预应力钢绞线孔道分布图如图 5 所示。

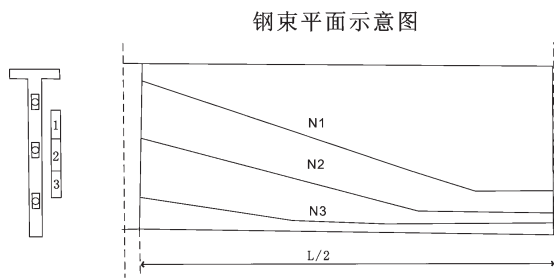


图 5 预应力钢绞线孔道平面示意图

3.2 雷达检测

试验采用 JL-BPAC(A) 桥梁预应力钢绞线孔道注浆

质量检测仪、SIR-3000 地质雷达(1.6 GHz)和美国绍尔岩芯钻机(钻孔外径:20 mm)进行检测。检测时参照预应力钢绞线在预应力梁体内的分布情况,根据 JL-BPAC(A) 桥梁预应力钢绞线孔道压浆质量检测仪检测结果进行分析,对存在缺陷的预应力梁板区域内纵横方向布设间距为 0.1 m 雷达测线,通过地质雷达检测,划定预应力孔道缺陷位置,最后用钻孔进行验证。试验对 33 片 T 梁预应力梁钢绞线孔道压浆质量进行检测,根据地质雷达扫描检测结果显示,白石高架桥右 2-6 大里程端 N1、N2 束、白石高架桥左 10-1 大里程端 N2、N3 束端头 0~70 cm 范围内压浆孔道顶部存在局部脱空区域,其雷达检测成果分别如图 6 和图 7 所示。其余桥梁压浆孔道压浆基本饱满,未发现明显异常。

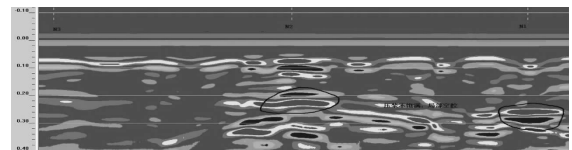


图 6 1#钻孔雷达检测

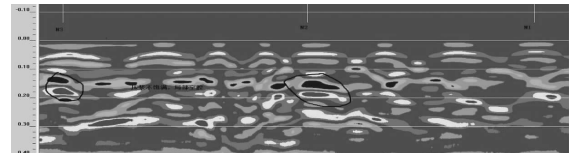
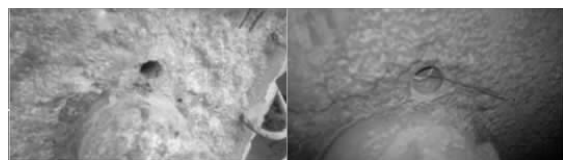


图 7 2#钻孔雷达检测

3.3 成果分析

图 6 白石高架桥右 2-6 大里程端 N1、N2 束,雷达图像显示为低频高振幅反射波,N1 束反射波为开口向下圆弧形同相轴,圆弧开口较大,深度大约在 0.25 m,N2 束反射波同相轴中部为平板,两端为半支开口向下圆弧,深度大约在 0.20 m,推测为注浆不饱满、局部空腔引起;图 7 白石高架桥左 10-1 大里程端 N2、N3 束,雷达图像显示为低频高振幅反射波,N2、N3 束反射波均为开口向下圆弧形同相轴,圆弧开口较小,深度大约在 0.20 m,推测为注浆不饱满、局部空腔引起。其余部位雷达波反射信号强度变化不大,同相轴连续性较好,未发现明显空隙,推断注浆孔道注浆饱满、连续^[7]。

根据 Matlab 数值模拟雷达正演成果分析可知,图 6 白石高架桥右 2-6 大里程端 N2 束可能为矩形空腔,N1 束为右圆形空腔;图 7 白石高架桥左 10-1 大里程端 N2、N3 束可能为上圆形空腔,为了确保结果准确,采用钻孔进行验证,如图 8 所示,其验证结果见表 1。



(a) 1#钻孔 (b) 2#钻孔

图8 钻孔验证

表1 钻孔位置定位检测结果

检测位置	钻孔号	孔道位置定位	钻孔验证情况
白石高架桥右 2-6大里程端	1#钻孔	大里程端端头 N1、N2束	钻孔深 20 cm, 孔道有 少量注浆, 注浆不饱满
白石高架桥左 10-1大里程端	2#钻孔	大里程端端头 N2、N3束	钻孔深 23 cm, 孔道有 少量注浆, 注浆不饱满

4 结束语

通过地质雷达正演模拟, 结合实测雷达图像对比, 经钻孔验证得出: 预应力钢绞线注浆孔道中缺陷为空洞, 雷达图像为低频高振幅反射波, 开口向下圆弧形同相轴, 缺陷埋深浅, 圆弧开口较小, 反之开口大; 预应力钢绞线注浆孔道中缺陷为矩形空洞, 雷达图像为低频高

振幅反射波, 其同相轴中部为平板, 两端为半支开口向下圆弧。

参考文献:

- [1] 吴佳华, 杨超, 季文洪, 等. 预应力管道灌浆质量检测方法的现状和进展[J]. 四川理工学院学报: 自然科学版, 2010, 23(5): 500-503.
- [2] 宋雷, 张小俊, 杨维好, 等. 人工冻结工程地质雷达模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 115-121.
- [3] 潘海结, 黄福伟. 探地雷达在桥梁预应力管道定位检测中的应用[J]. 华东交通大学学报, 2012, 29(1): 67-70.
- [4] 魏宇伟, 刘立, 金昊, 等. 地质雷达在米亚罗隧道超前地质预报中的应用[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2011, 30(6): 108-112.
- [5] 刘方镛, 王绪本, 焦健, 等. 频率域电磁剖面有限元差分法 2.5 维正演数值模拟[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(1): 79-84.
- [6] 刘四新, 曾昭发. 频散介质中地质雷达波传播的数值模拟[J]. 地球物理学报, 2007, 50(1): 320-326.
- [7] 韩振中, 张文连. 地质雷达在隧道检测中的波形识别及应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2008(6): 66-68.

Research of Duct Grouting Quality in the Ground Penetrating Radar of Bridge Prestressed Steel Strand

HUA De-jun¹, WANG Qi-ren¹, WANG Kun², HUANG Yu-feng¹, ZHANG Jian¹, DENG Guo-wen¹
 (1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
 2. College of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The duct grouting fullness degree of bridge prestressed steel strand are directly related to the safety and use-life of the bridge and the construction technology control and grouting effect testing arise more and more concern. The finite difference time domain method (FDTD) are applied and the generalized completely matched layer (GPML) are adopted as absorbing boundary, two-dimension forward modelling is demonstrated on the common grouting duct defect. Combined with engineering window verification, the characteristics and rules of duct grouting defects of radar image is summarized. The method provides duct grouting fullness degree of ground penetrating radar with evidence.

Key words: pre-stressing duct; quality of grouting; ground penetrating radar; finite difference time domain