

文章编号:1674-2869(2012)03-0032-06

综合评判法在混凝土密实度检测中的应用

柴修伟¹, 郭强², 车爱兰², 周艳平³, 舒胜东^{1*}

(1. 武汉工程大学环境与城市建设学院, 湖北 武汉 430074;

2. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240;

3. 上海交通大学航天航空学院, 上海 200240)

摘要:将注浆层空间中地质雷达信号差和面波反演后波速差作为评判因素,对注浆密实度进行综合评判.经推导出两评判因素与注浆密实度为近似线性关系;采用典型试验数据,用主成分法计算出两因素的权重集为{0.7218, 0.2782};根据注浆密实度情况,将评判集分为4个等级,即{密实, 较密实, 较差, 极差}.共进行了两次大规模模型试验,分别用于建立检测模型和结果验证,浆液凝固后可以移走上部平台,对表面凹坑精确测量,保证了数据的可信度.经检验,直径超过20 cm凹坑的判断准确率为100%, 10~20 cm为81.8%, 5~10 cm为60%, 小于5 cm为30.4%.

关键词:地质雷达;面波反射法;综合评判;工程检验

中图分类号:TD235

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2012.03.008

0 引言

沉管隧道是将若干预制的管段运至设定的水下沟槽内,组合安装成连接水体两端的隧道型交通运输载体.自1910年美国底特律河隧道施工首次采用沉管法以来,世界上已建和在建的沉管隧道已达120多座^[1].近年来该方法在我国很多工程中得到了应用,如上海外环沉管隧道、广州生物岛—大学城沉管隧道等^[2].隧道的管段部分采用压力注浆法进行地基处理,充填管底与基底之间的空隙,保证结构和基底受力均匀,减少不均匀沉降.施工中,从管段内部用通常的压浆设备,经预埋的管段底板上带单向阀的压浆孔,向管段底部空隙压注混合砂浆.受河底地形、水流、压浆设备性能及其它因素的影响,注浆过程中很可能会出现空洞,需要随时检测浆液的扩散和凝聚,并判断内部密实度情况,以便及时发现问题并采取补救措施.

国内在注浆密实度无损检测方面的研究尚处于起步阶段,相关文献很少.相对来说,国外已经进行了大量的研究并取得了一定的成果. Ralf Birken 等利用四维地质雷达可以监测地下流体运动的功能,利用空间反射率的变化建立了流体运动的三维模型,并提出了可视化表示方法^[3]. Fengshou Zhang 结合中国上海市地铁盾构施工中

注浆密实度检测问题研究了地质雷达用于该领域的可行性问题,结果表明,选用合适频率的接收天线能够得到较好的结果^[4-5].其它一些学者也在注浆密实度无损检测中做了大量研究工作,绝大部分均采用地质雷达探测的方法,包括参数设置、噪声过滤、结果判译、效果评价等,但实际使用中仍存在问题,受仪器本身或周围环境的影响,雷达接收能力受限,且信号强度具有一定的随机性,将其作为密实度评价的标准,会造成结果解译困难或错误.

根据沉管法施工的特点和要求,管段壁厚一般为1 m左右,需要探测深度在2~4 m;由于水下作业,要求探测手段能尽量避开水的影响;浆液内部不密实区域控制在0.5~1 m以内,要求探测精度不低于该值;注浆过程是连续进行的,中间间隔时间最长不得超过2 h,否则混凝土会凝固,通常要求不间断施工,因此要求检测手段方便、快捷,尽量与注浆过程同步完成^[6].

地质雷达利用高频宽带电磁波的反射探测地下目标,当频率为300~900 MHz时,对应的探测深度大致为1~6 m,且精度较高,能满足检测的需要,但电磁波遇水发生强烈反射,使其水下探测能力受到较大影响^[7-8].

面波在介质的表面传播,内部结构发生变化时具有频散性,通过探测得到从高频到低频的成

收稿日期:2012-01-03

作者简介:柴修伟(1980-),男,安徽亳州人,讲师,博士,采矿工程及爆破工程.*通讯作者

分对应的传播速度,用数学的方法按深度把这些信息分离开来,就可以推断出整个地下构造情况^[9].该方法精度有限,但是受环境影响较小,能够与地质雷达配合使用,互补长短.

混凝土浆液在水下的扩散对地质雷达和高密度面波检测结果的影响可认为具有随机性和模糊性,因此本文提出运用两种检测手段,采用模糊综合评判的方法进行结果处理和判断.浆液是一种砂浆混合物,通过试验发现,地质雷达检测中,内部存在较为明显和均匀的反射信号,因而在剖面图上显示为一个面,而不仅仅是一条交界面反射曲线,所以将注浆层空间内雷达、面波剖面的变化作为因素集.根据注浆密实度大小确定评判集;根据主因素法确定权值;根据试验数据确定聚类中心并建立相应的隶属度函数.

本文建立在两次次大规模模型试验的基础上,第一次用于建立计算模型,第二次为结果验证和运用.文中对两次试验的数据采集、处理、分析和最终结果一并做了详细的研究.

1 基本概念和原理

1.1 地质雷达探测原理

地质雷达是利用高频电磁波以宽频带短脉冲形式,由地面通过天线传入地下,经地下地层或目的物反射后返回地面,被另一天线接收.当存在电性差异界面时,电磁波发生反射,根据反射波的耗及时介质的电磁学性质就可以确定介质结构^[10].

电磁波在地层中的传播速度与介电常数相关,计算公式为:

$$V = C/\sqrt{\varepsilon} \quad (1)$$

其中: C 为电磁波真空中传播速度; ε 介质的相对介电常数.

电磁波反射系数与地层分界面两侧的电性差异越大,反射信号越强,计算公式为:

$$r = (\sqrt{\varepsilon_2} - \sqrt{\varepsilon_1})/(\sqrt{\varepsilon_2} + \sqrt{\varepsilon_1}) \quad (2)$$

其中, r 为反射系数, ε_1 、 ε_2 为界面上下介质的相对介电常数.

地质雷达探测深度与多种因素有关,在周围环境一定的情况下,主要与中心频率有关,频率越大,精度越高,但探测深度越浅,反之也一样.参考相关资料,不同频率天线的探测深度值如表1所示^[11].

表1 不同频率天线的探测深度值

Table 1 Penetrating depth of antenna with different frequency

| 频率 | 深度/m | 频率 | 深度/m |
|---------|------------|---------|---------|
| 2.5 GHz | 0.3 ~ 0.6 | 500 MHz | 1.5 ~ 3 |
| 1.0 GHz | 60 ~ 1.0 | 300 MHz | 3 ~ 6 |
| 900 MHz | 0.75 ~ 1.5 | 100 MHz | 10 ~ 20 |

1.2 高密度面波探测原理

面波只在介质的表面传播,但其传播速度却与地下构造有着密切的关系.常见的面波有瑞雷面波和勒夫面波,文中采用瑞利面波进行探测.瑞利面波的振幅从介质表面沿深度方向快速衰减,大约在半个波长以内约集中了全部能量的80%以上,在一个波长以内则集中了能量的约95%以上,所以传播速度主要由从介质的表面到半个波长的深度的介质决定,而几乎与1个波长以深的介质无关.显而易见,高频面波波长较短,只能穿透地表附近很浅的范围内的地层,因而其传播速度只反映浅层地下构造;低频面波,波长较长,能穿透从地表到深处的地层,因而其传播速度能反映从地表到深层的地下构造的综合影响.通过探测得到从高频到低频的瑞雷面波的传播速度,也就得到了反映整个地下构造的信息,用数学的方法按深度把这些信息分离开来,就可以推断整个的地下构造.

1.3 模糊综合评判方法

运用多个指标对多个对象进行评价的方法,称为综合评价方法,是将多个指标转化为一个能够反映综合情况的指标来进行评价.构成综合评价的要素主要有:指标集、评判集、隶属度、权重集^[12].

模糊综合评判可分为两大步:①按单个因素单独评判;②按所有因素综合评判.具体细分,共有六个步骤:1)建立因素集,即影响评判对象的各种因素构成的集合;2)建立权重集,即确定各因素的重要程度;3)建立评价集,即评判对象可能的评判结果组成的集合;4)单因素模糊评判,即单独从一个因素出发进行评判,确定评判对象对评价集的隶属程度;5)模糊综合评判,目的在于综合考虑所有因素的影响,得出更为合理的评判结果;6)评判指标的处理,经过前面几步之后,得到了评判指标 b_1, b_2, \dots, b_n ,用三种办法处理得出确定的评判结果:最大隶属度法、加权平均法以及模糊分析法.应根据实际情况选取最适合的评判方法来得出评价结果^[13].

2 试验研究

2.1 试验概况

天津海河隧道和浙江沈家门港海底隧道拟采用沉管法施工,首先在指定位置挖掘放置沉管的基坑,然后将岸边制作完成的沉管利用机械设备沉入水下放入基坑内.基坑与沉管之间的空隙采用压力注浆法填充,从管段内部用通常的压浆设备,经预埋在管段底板上带单向阀的压浆孔,向管段底部空隙压注混合砂浆.为得到施工过程中注浆压力与扩散半径关系、水泥砂浆配比与注浆效果的关系、注浆充填效果等资料,分别根据各自工程要求,进行了两次模型试验.试验平台浮在水面上,结构剖面见图 1,平台形状、尺寸和注浆孔、观察窗、测线布置见图 2.

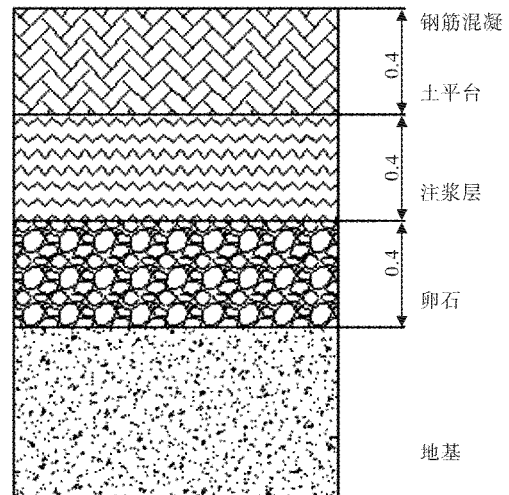


图 1 实验模型结构剖面图

Fig. 1 Profile for the test model

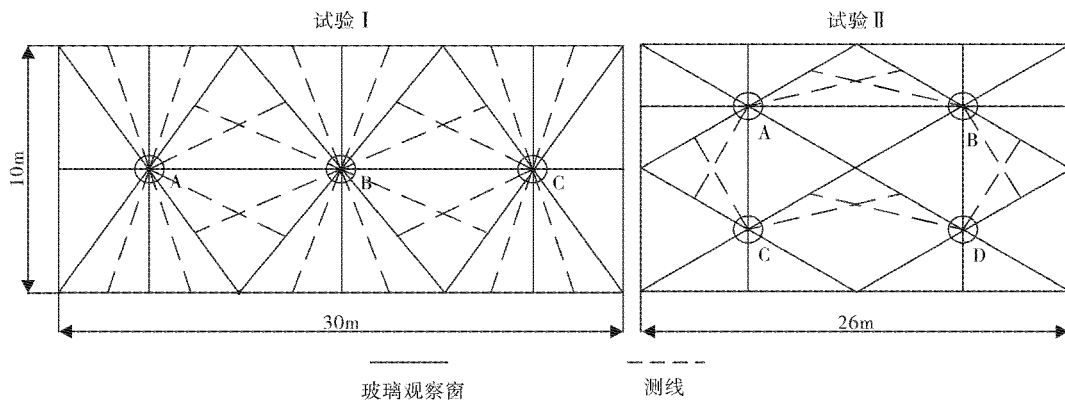


图 2 观察窗和测线布置图

Fig. 2 Arrangements of observation windows and test lines

试验 I 中,首先进行 A 孔单独注浆,达到预定效果后对 B、C 两孔同时注浆.试验 II 中,首先进行 C 孔单独注浆,然后对 A、B 两孔同时注浆.检测工作分多次进行,注浆前采集一次,记录初值状态.注浆结束后采集一次,记录终止状态.注浆过程中不间断地记录浆液扩散时的数据,同时记录对应的观察窗所显示的扩散范围.

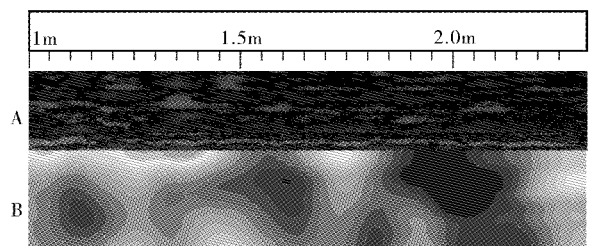
地质雷达型号为 SIR-20,由于探测深度在 1 m 之内,混凝土介电常数 7,水为 81,经过计算选用 900 MHz 天线;经估算,注浆层与碎石层的反射波双程走时约 40 ns,设置采集时窗为 80 ns;采用位移触发方式,为避开注浆孔周围密集钢板的影响,从距离注浆口 1 m 处开始采集数据.面波仪型号为 McSeis-170f,高截频 4 000 Hz,低截频 30 Hz,固有频率 100 Hz;震源采用人工抡锤激发方式,收发间距 0.2 m,起始采集点同样为距离孔口 1 m 的位置.

2.2 数据收集

通过试验得到了注浆前、后的地质雷达和面

波数据,浆液凝固 72 h 后,将平台移走,统计了沿测线方向上表面凹陷部位的范围和深度.

如图 3 为雷达和面波数据经处理后的结果剖面图,横坐标为位移,纵坐标为深度,颜色代表了信号的强弱.地质雷达反射剖面图 A 中,反射强的部分用深色表示,弱的部分用浅色表示.面波横波波速剖面图 B 中,波速高的部分用深色表示,低的部分用浅色.



A: 地质雷达反射剖面图; B: 面波横波波速剖面图

图 3 地质雷达和面波检测结果对比图

Fig. 3 Contrast image of GPR and surface wave results

2.3 综合评判模型的建立

根据前几节的论述,通过 6 个步骤建立本文

的评判模型。

2.3.1 建立因素集 上节提到,雷达波在浆液中的反射并不限于与水的接触面,内部也有明显反射现象,这是由于浆液中含有沙子引起的。

本文以注浆前后,注浆层空间内的雷达信号和面波反演结果的变化量为元素建立因素集, $U = \{\text{雷达信号强度变化量}(U1), \text{面波反演速度变化量}(U2)\}$,其中 $U2$ 为经过反演后的横波速度变化量。由于单个点变化随机性较大,故文中 $U1$ 、 $U2$ 采用 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 范围内的平均值表示。

a. 雷达信号强度变化与注浆密实度关系

假设砂子整齐排列,且直径均为 r , w 为浆液中砂子所占体积比, k 为密实度,取出其中一部分,体积为 $r \times dh$,注浆前,该空间为均匀介质—水,故反射信号为 0,注浆后入射波在砂子表面发射反射,反射系数均为 R ,入射波强度设为 P ,由于体积很小,可以视为传播过程中, P 保持不变,反射信号强度的变化设为 dP ,则存在以下关系:

$$dP = \frac{k w P R}{r} dh \quad (3)$$

由(3)可见,在其他条件不变的情况下,注浆区域内反射信号强度的变化与注浆密实度 k 成正比关系。

b. 面波速度变化与注浆密实度关系

本文速度反演采用的是剪切波,即横波反演。随着注浆密实度的提高,反演后的波速增大,这里近似认为两者之间是线性关系。

2.3.2 建立权重集 目前权重确定方法大致可分为两类:**a.** 主观赋权法,多是采用综合咨询评分的定性方法。这类方法因受到人为因素的影响,排序的结果不能完全真实地反映事物间的现实关系;**b.** 客观赋权法,即根据各指标间的相关关系或各项指标值的变异程度来确定权数,避免了人为因素带来的偏差。

查阅文献发现,该方法在注浆检测中的应用研究很少,相关资料搜集困难,只能通过试验中得到的数据进行处理,故权重的确定采用了第二种方法中的主成分分析法进行处理,该方法利用数据的变异程度来确定主、副成分^[14]。

从试验 I 中的每条测线上各采集 1 个样本,建立观测样本矩阵,得到 2×20 的矩阵 X ,进行标准化处理,然后计算指标数据的相关矩阵 r ,计算 r 的特征根并确定主成分,最后得到权重矩阵为 $(0.7218, 0.2782)$,雷达探测结果占主导地位,面波反演结果占次要地位。

2.3.3 建立评价集 根据对注浆密实度的要

求,评价集分为 4 个等级, $V = \{\text{密实(I)}, \text{较密实(II)}, \text{较差(III)}, \text{极差(IV)}\}$ 。文中注浆密实度指一定空间内混凝土浆液的所占比例,本文考虑工程要求,定义 I 表示密实度大于 90%, II 为 75% 和 90% 之间, III 为 55% 到 75% 之间, IV 表示小于 55%。

2.3.4 单因素模糊评判 通过第一次模型试验可知,地质雷达强度信号差最大 65 500,最小 800;面波反演速度差最大 5 500,最小 400。前面已经推导出两因素与密实度成近线性关系,根据上节密实度等级所代表的具体数值计算并作小幅调整,得到单因素评判集,见表 1。

表 1 各指标聚类中心值

Table 1 Values for cluster centers of the indexes

| | 密实 | 较密实 | 较差 | 极差 |
|------|--------|--------|--------|-------|
| $U1$ | 55 000 | 35 000 | 15 000 | 5 000 |
| $U2$ | 5 000 | 3 500 | 2 000 | 1 000 |

2.3.5 建立隶属度函数 分别根据 $U1$ 、 $U2$ 的 4 级评价标准分别得到 4 个隶属度函数:

1) $U1$

$$y_1 = \begin{cases} 0 & x \leq 35\ 000 \\ (x - 3.5e4)/2e4 & 35\ 000 \leq x \leq 55\ 000 \\ 1 & x \geq 55\ 000 \end{cases}$$

$$y_2 = \begin{cases} 0 & x \leq 15\ 000 \\ (x - 1.5e4)/2e4 & 15\ 000 < x < 35\ 000 \\ (x - 3.5e4)/2e4 & 35\ 000 < x < 55\ 000 \end{cases}$$

$$y_3 = \begin{cases} 0 & x \leq 5\ 000 \\ (x - 0.5e4)/1e4 & 5\ 000 \leq x \leq 15\ 000 \\ (x - 1.5e4)/2e4 & 15\ 000 \leq x \leq 35\ 000 \end{cases}$$

$$y_4 = \begin{cases} 0 & x \leq 5\ 000 \\ (x - 0.5e4)/1e4 & 5\ 000 \leq x \leq 15\ 000 \\ 0 & x > 15\ 000 \end{cases}$$

2) $U2$

$$y_1 = \begin{cases} 0 & x \leq 35\ 000 \\ (x - 3.5e3)/1.5e3 & 35\ 000 \leq x \leq 5\ 000 \\ 1 & x \geq 5\ 000 \end{cases}$$

$$y_2 = \begin{cases} 0 & x \leq 2\ 000 \\ (x - 2.0e3)/1.5e3 & 2\ 000 < x < 35\ 000 \\ (x - 3.5e3)/1.5e3 & 3\ 500 < x < 5\ 000 \end{cases}$$

$$y_3 = \begin{cases} 0 & x \leq 1\ 000 \\ (x - 1e3)/1e3 & 1\ 000 < x < 2\ 000 \\ (x - 2e3)/1.5e3 & 2\ 000 \leq x \leq 3\ 500 \end{cases}$$

$$y_4 = \begin{cases} 1 & x \leq 1\ 000 \\ (x - 1e3)/1e3 & 1\ 000 \leq x \leq 2\ 000 \\ 0 & x > 2\ 000 \end{cases}$$

2.3.6 综合评判 通过前面的分析和计算,得到了试验模型的因素集 U 、权重集 A 、评判集 V 、聚类中心值和隶属度函数。

对于待评判的指标值,由对应的隶属度函数可计算得到一个 2×4 的模糊关系矩阵 R 。

将权重系数集 A 和模糊关系矩阵 R 进行模糊复合运算:

$$B = AM(\cdot, +)R \quad (4)$$

$M(\cdot, +)$ 表示, A 和 R 先做点乘,再做和运算。最后得到了待评判指标值对于评判集各指标的隶属度矩阵,取 $\max(B)$,即最大隶属度作为归类的评判标准。

2.4 结果计算和分析

待处理对象是一个区域,即高度为 40 cm 的剖面,前面提到,单个值的变化具有较大随机性,所以以 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ 窗口的平均值来代替,相当于将剖面划分为长、宽均为 1 cm 的网格,然后对每个网格求平均值,并根据上一节所述步骤进行处理,结果采用图像的方式表示。

由于数据繁多,不便于一一展示,仅选取第二次模型试验中的一条测线进行分析。检测和处理结果见图 4,测线长 2.4 m。A 部分为雷达检测剖面图, B 部分为面波波速反演剖面图, C 部分为根据文中的综合评判方法计算得到的结果。浆液凝固后,移走试验平台,沿该测线统计了凹坑的数量和最大深度,共统计 4 个较大的凹坑,深度分别为 8 cm、6 cm、5 cm、12 cm,见图中 D 部分。

由 A 可知,注浆后,由于浆液中碎石的反射,注浆层空间内的反射信号明显加强,同时也可看出,存在多处明显弱反射区,大部分分布在上表面,部分靠近下表面,如果直接根据该结果作为判断依据,就会做出浆液底部存在不密实区域的判断,但试验中注浆空间较小,浆液流动性较好,不可能有底部填充不密实的情况发生。

由 B 可见,注浆后,空间内的波速分布出现了明显变化,由上到下逐渐增大,与实际情况相符。

由 C 可见,表面附近的位置等级较低,下半部分整体等级较高,与实际工程中上疏下密的情况相符。从图中也可以看出,对于存在的凹坑,从结果中均得到了准确反映,证明了该方法可以在连续注浆检测中能够提供可靠依据。

前后对 12 条测线的密实度情况作了详细勘察和统计,并与评判结果进行了对比,结果见表 2,文中认为等级为 III、IV 的区域可能存在空洞。从表中可以看出,采用该方法能够准确识别直径在 20 cm 以上的凹坑,随着直径的减小,识别率急剧

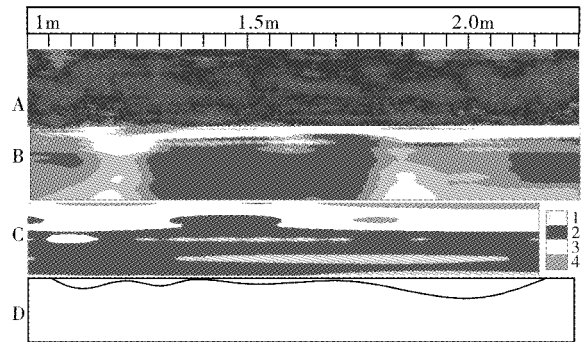


图 4 检测结果和综合评判图

(A:雷达检测剖面图;B:面波波速反演剖面图;
C:综合评判结果;D:凹坑大小示意图)

Fig. 4 Images of the test results and comprehensive evaluation

减小,说明了该方法不适用于小孔洞的识别,适用条件为直径大于 20 cm。

表 2 评判结果对照表

Table 2 Table of results cross-references

| 最大深度 | 统计量/条 | 识别量/条 | 识别率/% |
|------------|-------|-------|-------|
| 1 ~ 5 cm | 23 | 7 | 30.4 |
| 6 ~ 10 cm | 15 | 9 | 60.0 |
| 10 ~ 20 cm | 11 | 9 | 81.8 |
| 20 cm 以上 | 4 | 4 | 100 |

3 结 语

本文将模糊综合评判法应用到沉管隧道施工中注浆密实度的快速检测中,经过推导、试验和分析得到了以下结论:

a. 试验中发现注浆层表面及内部均存在反射信号,这是由于浆液中碎石的反射引起的,推导出反射信号的强度与注浆密实度成正比关系。

b. 采用模糊评判方法对雷达和面波数据进行综合评判,与单一方法相比能够更好地识别内部不密实区域。

c. 通过试验发现,在文中试验条件下,采用本文提出的方法能够准确识别直径大于 20 cm 的孔洞。

参考文献:

- [1] 薛勇. 沉管隧道接头研究[J]. 特种结构, 2003, 20 (3): 4-8.
- [2] 宁茂权. 沈家门港海底沉管隧道设计介绍[J]. 现代隧道技术, 2008, 45(6): 61-69.
- [3] Ralf Birken, Roelof Versteeg. Use of four - dimensional ground penetrating radar and advanced visualization methods to determine subsurface fluid migration[J].

- Journal of Applied Geophysics, 2000, 43 (2 - 4): 215 - 226.
- [4] Fengshou Zhang, Xiongyao Xie, Hongwei Huang. Application of ground penetrating radar in grouting evaluation for shield tunnel construction [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2010, 25 (2): 99 - 107.
- [5] 殷习军, 王修勇. 地质雷达在节段梁注浆密实度检测中的应用 [J]. 城市道桥与防洪, 2007 (2): 103 - 105.
- [6] 程新生, 李书轮. 水下沉管隧道岩土工程勘察要点探讨 [J]. 中国港湾建设, 2010, 166: 42 - 46.
- [7] 朱发华, 贺怀建. 基于地质雷达和钻孔数据的三维地层建模 [J]. 岩土力学, 2009, 30 (增刊): 267 - 270.
- [8] 柴华友, 韦昌富, 白世伟. 表面波有效相速度近似分析方法 [J]. 岩土力学, 2008, 29 (1): 87 - 93.
- [9] Pérez - Gracia V, García García F, Rodríguez Abad I. GPR evaluation of the damage found in the reinforced concrete base of a block of flats [J]. NDT & E International, 2008, 41 (5): 341 - 353.
- [10] 李大心. 探地雷达方法与应用 [M], 北京: 地质出版社, 1994.
- [11] 李嘉, 郭成超, 王复明, 等. 探地雷达应用概述 [J]. 地球物理学进展, 2007, 22 (2): 629 - 637.
- [12] Zhou Yunxia, Zhou Yongzhang, Xie Shuyun, et al. A Grey Fuzzy Comprehensive Model for Evaluation of Geological Structure Complexity [J]. Journal of China University of Geosciences, 2008, 19 (4): 436 - 440.
- [13] Harun Sonmez, Candan Gokceoglu, Resat Ulusay. An application of fuzzy sets to the Geological Strength Index (GSI) system used in rock engineering [J]. Applications of Artificial Intelligence, 2003, 16 (3): 251 - 269.
- [14] 宋之杰, 高晓红. 一种多指标综合评价中确定指标权重的方法 [J]. 燕山大学学报, 2002, 26 (1): 20 - 22.

Comprehensive evaluation method in examination on concrete grouting density

CHAI Xiu-wei¹, GUO Qiang², CHE Ai-lan², ZHOU Yan-ping³, SHU Sheng-dong¹

(1. School of Environment and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

3. School of Aeronautics & Astronautics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The difference of ground penetrating radar signal intensity and the speed difference of surface wave inverted were appointed as fuzzy evaluation factors to evaluate the grouting intensity comprehensively. According to deduction, the relation of the two elements and grouting intensity was approximate linear. With typical experiment data, the weighting set was calculated as {0.721 8, 0.278 2} by principle component analysis method. According to grouting intensity, the evaluation set was divided into 4 grades, which are {compact, relatively compact, relatively poor, extremely poor}. Two large scale model tests were proceeded to create evaluation model and to validate results respectively, and the hole depth on the platform surface was measured accurately later, so the data is reliable. Upon examination, the judging accuracy to the hole whose diameter exceeds 20 cm is 100%, 81.8% to 10-20 cm, 60% to 5-10 cm, and 30.4 to 0-5 cm.

Key words: ground penetrating radar; surface wave reflection method; comprehensive evaluation; engineering test

本文编辑: 龚晓宁