

混凝土与无纺布结构界面处空鼓类缺陷的检测分析

郭林

上海同济检测技术有限公司

摘要: 目前行业内关于混凝土缺陷的无损检测方法很多,如常规超声法、冲击回波法、雷达法、相控阵超声成像法等,可以实现混凝土内部空洞、蜂窝、离析、分层等缺陷识别,这方面的检测应用研究资料较多,但关于混凝土内部结构界面处的缺陷检测研究资料不多。通过一个工程实例来验证相控阵超声成像法与结构雷达法对混凝土内部结构界面处的空鼓类缺陷检出能力。相控阵超声设备采用A1040 MIRA 3D混凝土超声波成像仪,结构雷达设备采用GP8000。结果表明:超声信号在无纺布结构界面处近乎全发射,成像图中显示多次界面反射,且反射信号强度基本一致,无法直接判断混凝土与无纺布结构界面处的空鼓类缺陷情况;电磁波信号可穿透无纺布结构界面,且成像图中可显示结构界面附近的反射信号能量差异,对信号异常区域进行钻孔内窥验证,表明结构雷达法可对混凝土与无纺布结构界面处的空鼓类缺陷情况进行判别。

关键词: 混凝土缺陷; 结构界面; 空鼓; 相控阵超声成像法; 结构雷达法

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2024.01.024

引言

混凝土结构是现今工程上常见的工程结构。混凝土作为非匀质材料,在浇筑过程中经常会存在不同种类的缺陷,如空洞、蜂窝、离析、分层等。关于混凝土内部缺陷的检测方法也比较多,目前在用的无损检测方法有常规超声波法^[1]、冲击回波法^[2]、雷达法(探地雷达^[3]与结构雷达^[4])、相控阵超声成像法^{[5]~[7]}等。范泯进等^[2]采用冲击弹性波法对混凝土缺陷进行试验研究,对混凝土底板裂缝与脱空类缺陷均有识别。沈捷等^[3]采用探地雷达法对水利工程水工混凝土内部缺陷进行检测分析,探明了防浪墙内部存在的缺陷。陈颖斌等^[4]采用结构雷达对装配式混凝土新旧结合面处的缺陷进行检测技术研究,发现结构雷达法可有效识别装配式混凝土新旧结合面处的缺陷。杜惠光等^[5]、张建清等^[6]、姚利君等^[7]均采用相控阵超声成像法对混凝土内部质量进行检测,对脱空、结合面缺陷等有一定检测效果。上述方法对混凝土内部的分层类缺陷均有一定的检测能力,但如果混凝土内部本身存在结构分层界面,能否识别结构界面处的空鼓类缺陷,有待进一步验证。本文结合工程实际来验证相控阵超声成像法与结构雷达法对混凝土与无纺布结构界面处空鼓类缺陷的检测能力。

一、项目概况

某项目一层地面采用双层混凝土结构,下层为150mm厚的钢筋混凝土,上层为100mm厚的素混凝土,两层之间采用3mm~5mm的无纺布进行隔离。具体构造见图1。因使用需要,地面上层混凝土在浇筑完成后进行了切割,切割深度约30mm,分成多个板块,板块与板块

之间无传力杆进行连接。在地面使用一段时间后,运行车辆走过部分板块时,有异响产生。项目组织专家研究后,初步认为板块在切缝端部产生翘曲、脱空等变形,需采用无损检测方法对异常板块进行检测,重点分析区域为上下层混凝土交界面处。

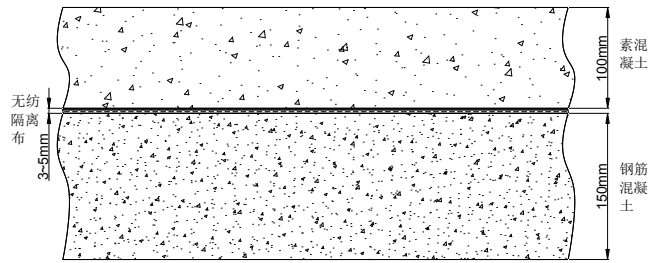


图1 地面具构造图

二、检测原理

根据项目情况,采用相控阵超声成像法及结构雷达法对试验区进行检测。

(一) 超声原理^[8]

不同材料有不同的声阻抗,声阻抗又称为声波阻抗或音阻,它是影响超声波传播的重要因素。声波传导的本质是“介质偏离平衡态的小扰动”的传播,声阻抗是让介质位移所需克服的阻力,它是介质一种物理特性。每一种介质都有独特的声阻抗,代表介质对声波传输的阻力,它的值为介质中声音密度和速度的乘积。当超声波从材料1(Z1)入射到材料2(Z2)时,在两种材料界面处会产生反射和透射现象。其中反射系数R的大小由公式(1)得出:

$$R = \frac{(Z2 - Z1)^2}{(Z2 + Z1)^2} \quad (1)$$

查阅相关资料,可以得出各材料的声阻抗数值如下:混凝土为 $1.08 \times 10^6 \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,尼龙为 $0.29 \times 10^6 \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,空气为 $0.00004 \times 10^6 \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,结合公式(1)可以得出混凝土空气界面声波反射系数R1约为100%,即声波如果在混凝土里面遇到空气界面近乎全反射;混凝土尼龙界面声波反射系数R2约为33%,即声波如果在混凝土里面遇到尼龙界面约33%的能量反射回来。

(二) 雷达原理^[9]

雷达探测信号是电磁波信号,主要是依据目标物与周围区域的相对介电常数不同,目标物与周围区域接触的面形成了雷达的反射界面。反射界面对雷达波的反射能力称之为反射率。目标物和周围区域的相对介电常数差异越大,反射率越大,则该目标物对雷达波越敏感,雷达探测的信号则越强,反之则越弱。当电磁波由材料1(ϵ_1)入射到材料2(ϵ_2)时,在两种材料界面处会产生反射和透射现象。其中反射系数R的大小由公式(2)得出:

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (2)$$

查阅相关资料，可以得出各材料的相对介电常数如下：混凝土为6~10，钢筋为∞，空气为1，尼龙为4~5，由公式（2）可以得出，混凝土空气界面反射系数R1约为45%，即电磁波如果在混凝土里面遇到空气界面约45%的能量反射回来；混凝土尼龙界面反射系数R2约为14%，即电磁波如果在混凝土里面遇到尼龙界面约14%的能量反射回来；混凝土钢筋界面反射系数R3约为100%，即电磁波如果在混凝土里面遇到金属界面近乎全反射。

综上，超声波信号与电磁波信号在混凝土空气界面与混凝土尼龙界面的反射信号能量存在较明显区别。

三、检测难点

混凝土为非均匀介质，是由水泥、骨料、孔隙等组成的复杂胶凝体，反射信号易受到干扰，实际检测过程中的两种界面（混凝土空气界面与混凝土尼龙界面）反射信号与理论值会存在差异。另外，目前行业内的检测设备对两种界面的反射能量差能否有效区别，暂不确定。

四、现场检测

（一）相控阵超声成像法

对现场试验区采用A1040 MIRA 3D混凝土超声波成像仪检测，为单面反射法超声检测，设备平行通道数为32通道，可对混凝土内部实时3D成像，成像图中颜色由红到蓝依次对应反射信号由强到弱。现场布线采用网格化布置，横向测线间距100mm，纵向测线间距150mm，进行面积扫查，扫查前找已知厚度区进行声速标定，现场检测照片见下图2及图3。

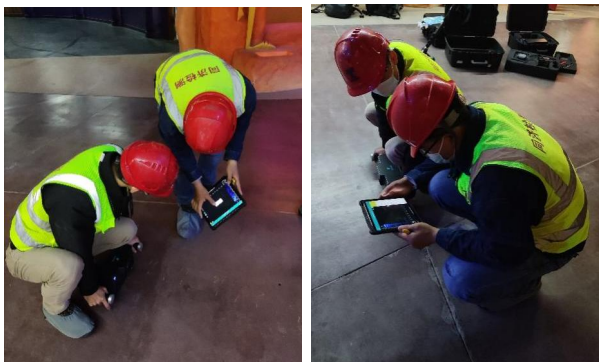


图2 超声成像检测
对现场采集数据进行分析处理，最终成像图如下图4:

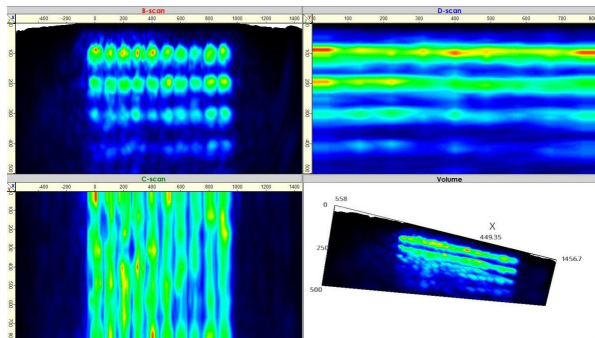


图4 混凝土超声成像图

由左上角B-SCAN成像图可得，超声信号在100mm无纺布界面处有强烈反射，并形成4次的来回反射，信号无法穿透下去。因设备不能对反射信号能量进行绝对量化，由左下角C-SCAN成像图中反射信号色谱图相对差异可得，反射信号的强弱也基本一致，无法直接判断混凝土与无纺布结构界面处的空鼓类缺陷情况。

（二）结构雷达法

对同一试验区采用结构雷达进行检测，设备采用GP8000。雷达信号为逐次递进的窄带脉冲频合成超宽带频率的连续雷达波，频率范围为0.4 Ghz ~4 Ghz，可以在全深度（80cm以内）范围内进行一次性高清晰度成像，同时保证优异的深度分辨率和信噪比。结构雷达不同于常规探地雷达，结构雷达适合小空间、柱面、曲面等混凝土墙面或楼板里的缺陷及钢筋测试，可对被测对象进行快速扫描，并对混凝土内部情况生成2D剖面及3D重构。现场布线同样采用网格化布置，纵向（X方向）和横向（Y方向）测线间距均为30cm，画好网格后，从网格的原点位置开始逐条测线进行扫查，首先Y方向扫查，待Y向扫查完成后再从右上角进行X方向扫查。检测主要针对深度10cm（无纺布结构界面）附近处的混凝土进行雷达反射信号2D剖面成像，成像图中颜色由红到蓝依次对应反射信号由强到弱。现场检测照片见下图5及图6。



图5 结构雷达检测
图6 结构雷达检测

对现场采集数据进行分析处理，最终成像图如下图7:

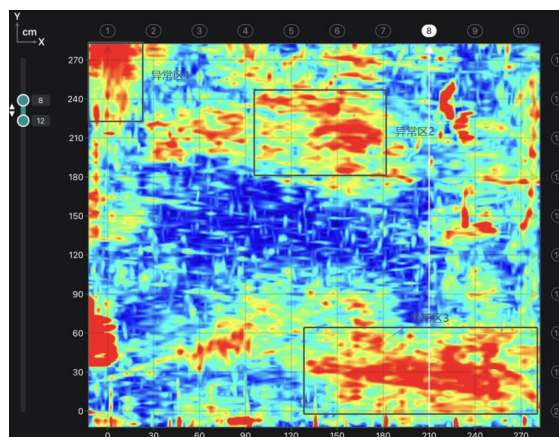


图7 深度8cm~12cm的2D剖面成像图

由上图可得，电磁波信号可穿透无纺布界面，且深度8cm~12cm处的雷达反射信号能量存在明显区别，其中主要有3处强反射信号异常区（经现场勘查，左下角强反射信号异常区为一处预留的配电箱洞），分别为左上角的异常区1、中部的异常区2和右下角的异常区3。这是因为当电磁波传播到分层界面接触紧密区域时，电磁波反射系数小，均匀衰减，电磁波在此界面反射信号不强烈。当无纺布隔离层界面存在空鼓类缺陷时，电磁波反射系数大，反射信号明显，响应信号强烈，相比于结构界面无空鼓的响应信号显得异常突出、明显。因此，结构雷达法可初步判断混凝土与无纺布结构界面处的空鼓类缺陷情况。

(三) 钻孔内窥验证

在3处异常区确定钻孔位置，采用直径10mm、长度200mm的钻头进行钻孔，提前在钻头上标记好深度，钻孔深度为120mm，穿透无纺布隔离层。钻进过程中中断2次，及时对孔道进行清灰，第3次钻进到120mm预定深度，并进行最终清灰。异常区1在钻进过程中钻头有明显突进，异常区2在钻进过程中钻头无明显突进，异常区3在钻进过程中钻头有明显突进。采用建筑专用测量内窥镜BD-CL进行内窥观测，发现异常区1和异常区3的钻孔内部有空鼓，异常区2的钻孔内无明显空鼓。仔细观察内窥影像可以发现，异常区1和异常区3的影像孔壁有毛刺，毛刺为无纺布纤维，可见空鼓主要位于无纺布界面的下部。现场钻孔及内窥影像照片见下图8~图11。



图8 异常区钻孔照片

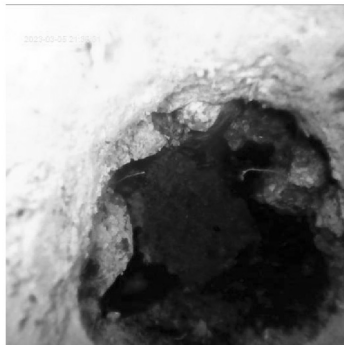


图9 异常区1钻孔内部影像

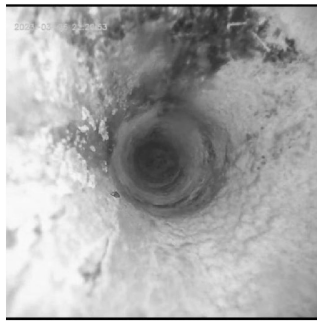


图10 异常区2钻孔内部影像

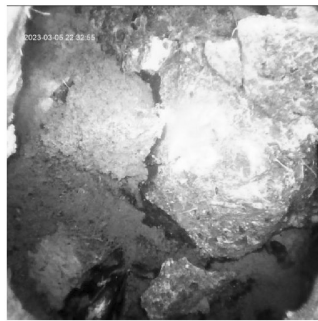


图11 异常区3钻孔内部影像

(四) 补充分析

由钻孔内窥可知，异常区2的钻孔影像未发现明显空鼓异常。由8cm~12cm的2D剖面成像图可知，测线6同时经过异常区2和异常区3，对测线6的原始雷达数据图

（见下图12）进行分析，发现异常区3对应信号比异常区2对应信号显示为更明显的“白黑白”信号。这是因为电磁波传到空鼓类缺陷时，空气与周围介质的介电常数存在较大差异，电磁波在空鼓处的反射系数变大，振幅变大，在原始雷达数据图中显示为异常白色同相轴反射信号。可见采用结构雷达检测时，对异常信号区域的原始雷达数据图进行分析观察是十分必要的。

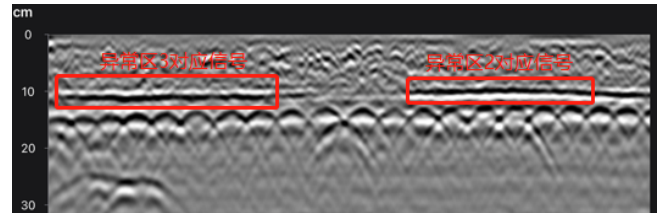


图12 测线6原始雷达数据图

五、结论

综上所述，在对混凝土无纺布结构界面处空鼓类缺陷进行检测时，可得出如下结论：

- 1) 相控阵超声成像法检测时，超声信号无法穿透混凝土中无纺布隔离层，在无纺布结构界面处近乎全反射，反射信号色谱图中反射信号的强弱也基本一致，无法直接判断混凝土与无纺布结构界面处的空鼓类缺陷情况；
- 2) 结构雷达法检测时，电磁波信号可穿透混凝土中无纺布隔离层，且成像图中可显示结构界面附近的反射信号能量差异，对信号异常区域进行钻孔内窥验证，表明可对混凝土与无纺布结构界面处的空鼓类缺陷情况进行判别；
- 3) 结构雷达法检测时，可根据设备反演出的2D或3D成像图对异常情况进行初判，最终结果需结合雷达原始数据图分析后进行综合判定。

参考文献

[1] 林维正. 土木工程质量无损检测技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 139-172.

[2] 范泯进, 朱燕梅, 沙椿. 声波反射成像法识别混凝土缺陷试验研究 [J]. 水利规划与设计, 2016 (09).

[3] 沈捷, 房殿荣, 黄成, 乔小琴. 探地雷达图像分析技术在混凝土结构检测中的应用 [J]. 珠江水运, 2018 (07).

[4] 陈颖斌, 宋雄彬, 谭学民, 廖兴升, 凌造. 基于雷达法的装配式混凝土新旧结合面缺陷检测技术应用研究 [J]. 广州建筑, 2022 (02).

[5] 杜惠光, 胡丹. 阵列超声横波反射技术在混凝土检测中的应用 [J]. 水利规划与设计, 2018 (05).

[6] 张建清, 蔡加兴, 庞晓星. 超声横波成像法在混凝土质量检测中的应用 [J]. 大坝与安全, 2016 (03).

[7] 姚利君, 李华良, 管文, 高润东等. 相控阵超声成像法检测钢筋混凝土叠合构件缺陷研究 [J]. 施工技术, 2017 (17).

[8] 郑晖, 林树青. 超声检测 [M]. 北京: 中国劳动保障出版社, 2008: 7-52.

[9] 李大心. 探地雷达方法与应用 [M]. 北京: 地质出版社, 1994: 5-26.