

基于贴片天线传感器的混凝土凝结状态 监测研究

易卓然¹，谢丽宇²，薛松涛^{3,4}，万国春⁵

1. 硕士研究生，同济大学，上海，yzr1997@tongji.edu.cn； 2. 讲师，同济大学，上海，liyuxie@tongji.edu.cn
3. 教授，同济大学，上海，xue@tongji.edu.cn 4. 教授，日本东北工业大学，日本仙台，xue@tongji.edu.cn
5. 副教授，同济大学，上海，wanguochun@tongji.edu.cn；

摘要：混凝土介电常数随含水率升高而降低，贴片天线的谐振频率随上覆物和周围环境的介电常数降低而升高，因此可以通过将贴片天线置于混凝土表面或内部达到对混凝土含水率的监测。本文提出了一种用贴片天线对混凝土凝结状态进行监测的设计方案。该方案通过对混凝土凝结期间的含水率的监测，达到监测混凝土凝结状态的目的。基于HFSS的数值模拟证明，随着贴片天线上覆物的介电常数升高，贴片天线的谐振频率下降。凝结状态监测试验表明，天线的谐振频率变化与净浆含水率之间有较强相关性。长效监测试验表明，天线谐振频率逐渐趋于稳定，这与水泥净浆试块含水率变化趋势吻合。

关键词：贴片天线，混凝土，凝结时间，谐振频率

1 引言

混凝土结构在结构工程中占有重要地位。在混凝土结构施工过程中，对混凝土状态如强度、温度、凝结状态等的实时监测是保证工程质量最重要的举措之一^[1]。目前的施工过程中，有的基于经验对混凝土凝结状态进行监控^[2]，但这不利于工程的规范化进行，会带来相应的安全隐患；有的采用早期变形特征对凝结状态进行预测^[3]，但这种方法较难适用于已浇筑混凝土，实施较为困难。因此，有必要研究一种适用于实际工程的混凝土凝结状态监测方法。

近年来，基于贴片天线的传感器研究逐渐兴起。贴片天线的谐振频率与其上覆物的介电常数、厚度、固液状态等有关^[4]。在施工过程中，可以将贴片天线黏贴于混凝土测点，通过检测贴片天线的谐振频率变化，得到混凝土构件的含水率变化，从而对混凝土施工期间的凝结状态变化进行监测。经过改进设计，贴片天线谐振频率的取得可以不需要馈电线提供能源和传输数据，因此，这个检测过程将会是无源无线的^[5]。

本文对基于贴片天线的水泥净浆的凝结状态监测和长效监测进行了一定的研究。首先，对贴片天线上覆物介电常数变化和谐振频率之间的关系进行了模拟仿真。仿真数据显示，随着上覆物介电常数的提升，贴片天线的谐振频率逐渐降低。随后，对PO42.5标号的水泥，探究了其凝结状态期间的含水率变化和黏贴于水泥净浆试块上的贴片天线谐振频率变化间的关系，并进行了长效监测试验。试验结果表明，贴片天线的谐振频率与水泥净浆的含水率变化有相同的趋势。

2 混凝土与贴片天线协同工作机理

2.1 贴片天线工作原理

天线的工作模式与工作频率与外界环境有一定关系，尤其是在进行无线测量时。无线测量过程中，贴片天线的谐振效应与其四方介质的介电常数与电导率有关，其中，介质的介电常数影响天线谐振频率值，介质的电导率影响天线谐振频率处的带宽。You等^[6]研究了贴片

天线的谐振频率和上覆物之间的关系。贴片天线被置于泥浆下，随着泥浆含水率的降低，贴片天线的谐振频率随之产生了一定的变化。Tchafa 等^[7]就上覆灰对天线谐振频率的影响进行了研究。贴片天线被置于灰堆下。模拟和试验都显示，随着灰堆的高度升高，贴片天线的谐振频率随之线性变化。但是，由于理论计算较为复杂，目前对该现象仍没有理论上的解释。

2.2 混凝土凝结期含水率变化与介电常数变化（以硅酸盐混凝土为例）

混凝土中，水泥浆体的水化实际上是水泥中成分与水的反应。在硅酸盐水泥中，水泥浆体的主要成分是硅酸三钙（C₃S）。C₃S 的早期水化可以分为五个阶段，分别是初始水化期、诱导期、加速期、衰退期和稳定期。硅酸盐混凝土含水率变化理论曲线如图一所示。初凝开始之后，C₃S 水化反应进入诱导期，含水量几乎不变；混凝土接近终凝时，诱导期结束，C₃S 水化反应进入加速期，含水率显著下降。

在混凝土的养护过程中，混凝土中的水分和离子都能减缓电磁波的传播速度并带来衰减，表现在混凝土性质上，即是混凝土的介电常数随混凝土孔隙率、含水量和离子浓度变化而改变。一般而言，混凝土的介电常数与各组分的关系可以由下式进行计算^[8]

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^3 V_i^2 \omega_i + 4 \sum_{m=2; i=m}^3 V_{m-1} V_i \frac{\omega_{m-1} \omega_i}{\omega_{m-1} + \omega_i} \quad (1)$$

其中， ε 为混凝土的介电常数； ω_i 为混凝土中三相的介电常数。对于混凝土的固相、气相、液相，依据现有研究，其介电常数分别为 6、1 和 82^[9]； V_i 是混凝土中三相的体积分数。由于固相和气相介电常数远低于混凝土液相，混凝土固相对混凝土介电常数的影响远低于混凝土液相。因此，在后续研究中，为简化模型，采用水泥净浆作为检测对象，着重考虑混凝土含水量对水泥净浆介电常数的影响。

2.3 混凝土与贴片天线协同工作机理

在混凝土凝结过程中，由于水解作用的进行，混凝土的含水率和导电性都会发生较大变化。因此，结合现有研究，考虑将贴片天线置于新浇筑混凝土上，由于混凝土（净浆）的强度发展与含水量密切相关，用于监测的贴片天线的谐振频率变化可以用来表征混凝土（净浆）的含水量和强度，从而达到反映混凝土凝结状态的作用。另外，在混凝土强度发展较为完全后，混凝土内部水分大部分转化为蒸发水和内部渗水。此时，原内置天线可以作为混凝土渗水监测传感器，用来检测混凝土是否渗水。贴片天线监测系统的工作原理图如图 1 所示：

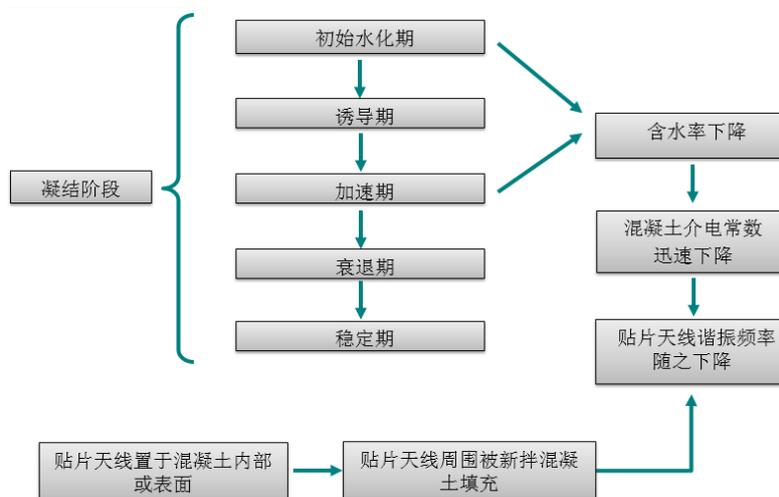


图 1 贴片天线监测系统工作原理图

3 数值模拟

对目标模型进行了基于高频结构仿真（HFSS）的建模仿真和有限元分析。仿真结果显示，随着上覆物的介电常数上升，待测贴片天线的谐振频率随之下降。

3.1 数值模拟模型介绍

在 HFSS 中建立的模型如图 2 所示。模型由上覆物与一块谐振于 2.4GHz 的贴片天线构成。上覆物与贴片天线一同被置于空气腔内。贴片天线采用波端口进行馈电。在模拟过程中，上覆物介电常数不断改变。

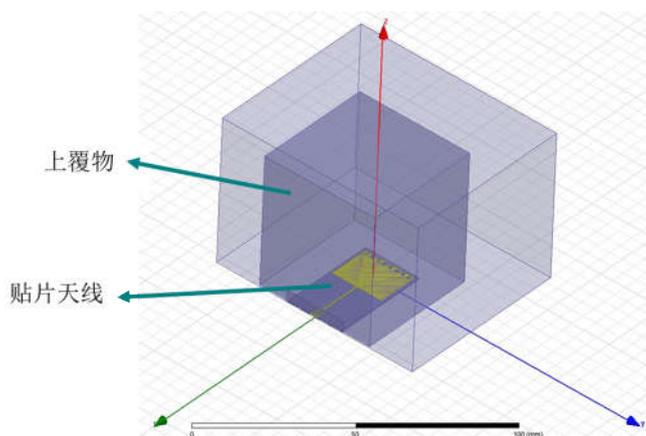


图 2 HFSS 天线模型图

天线设计尺寸与上覆物尺寸如表 1 所示：

表 1 天线模型设计尺寸图

设计参数	上覆物尺寸(mm ³)	天线长(mm)	天线宽(mm)	贴片长(mm)	贴片宽(mm)	谐振频率(GHz)
尺寸	45×45×45	36.7	22	20	15.7	2.41

3.2 数值模拟数据分析

经过数据处理分析，得到贴片天线的回波损耗曲线和谐振频率变化曲线。由图 3 可知，随着介电常数的上升，天线的各阶频率都有下降的趋势。提取第三阶频率，谐振频率随上覆物介电常数变化如图 4 所示。由图可知，介电常数与谐振频率之间的关系是近似线性的。

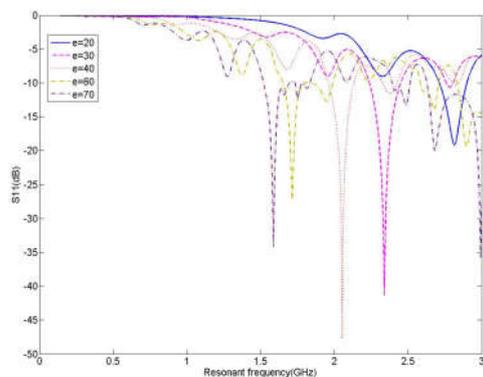


图 3 回波损耗图

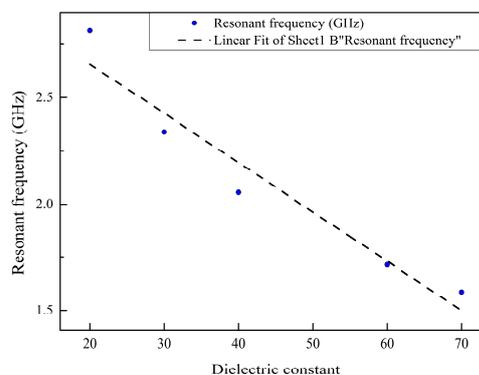


图 4 介电常数-谐振频率图

4 水泥净浆凝结试验

4.1 试验材料

在具体试验中，主要采用以下两种试验材料：

- ①. PO42.5 普通硅酸盐水泥；
- ②. 工作频率约为 2.4GHz 试验贴片天线，其尺寸与模拟所用天线相同；

4.2 试验设计

4.2.1 水泥净浆初凝终凝时间测定试验

- ①. 每次拌制 400g 水泥净浆并制作一组试模，按标准 GB1346-2011 测定标准稠度；
- ②. 搅拌 1000g 水泥净浆，制作两组模具，按标准 GB1346-2011 进行养护并测定净浆的初凝时间和终凝时间；

4.2.2 水泥净浆凝结状态监测试验

- ①. 搅拌标准稠度配合比水泥净浆 2000g，制作三个 PVC 试模、一组维卡仪模具和一组方模。其中，维卡仪模具用来测定净浆初凝与终凝时间，两组模具用来测定谐振频率，一组模具用来测试含水率变化；
- ②. 委托加工制作三块同规格贴片天线，分别置于模具内部、模具底部并用胶带固定密封防止净浆侵入、模具底部并不用胶带固定密封。
- ③. 在终凝前，每隔 15min 测定一次三组天线的谐振频率，并记录数据；
- ④. 按标准 GB1346-2011 进行养护并测定净浆的初凝时间和终凝时间；

4.2.3 水泥净浆终凝状态含水量监测试验

- ①. 搅拌同配合比水泥净浆 1000g，制作一组维卡仪模具和一组方形模具，按照标准稠度进行水泥净浆拌制，并在标准养护条件下进行养护；
- ②. 通过维卡仪模具测定凝结时间；自净浆拌制时开始，每隔 20min 从方模内取样 20g 左右，称量原始重量；烘干后称量干重，并计算含水率；

4.2.4 水泥净浆长期监测试验

- ①. 在完成水泥净浆凝结状态监测试验后，对三组 PVC 试块进行长效监测；
- ②. 对三组水泥净浆试块进行空气养护，每隔 24h 测定一次谐振频率，持续至 28d；

4.3 试验说明

初步进行了水泥净浆凝结时间测定试验、凝结状态和含水率监测试验和长效监测试验。凝结状态试验统一采用标准养护，长效监测则采用空气养护。养护环境、试验方式、试模形状和测试环境如图 5-7 所示：



三种装满净浆的方模

图 5 试模图

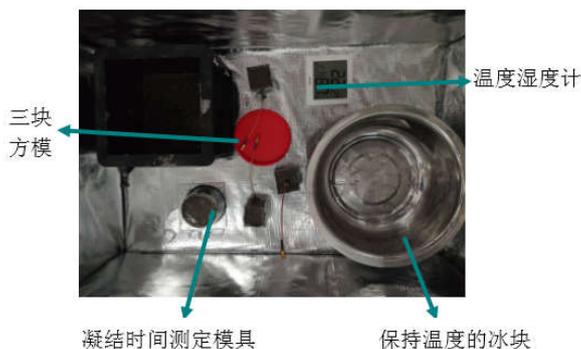


图 6 养护环境图



图7 谐振频率测试图

4.4 试验分析

对第四节所得的数据进行分析。数据分析表明，天线的谐振频率与水泥的含水量之间存在相同趋势关系，因此，可以使用天线的谐振频率对水泥净浆凝结过程进行标定。在长效监测中，三组天线的谐振频率都趋近一个临界值，这是符合原理的。

4.4.1 水泥净浆凝结状态监测

对水泥的含水率和贴片天线的谐振频率进行了处理，结果如图9所示，蓝实线表征含水率，黑虚线表征谐振频率。水泥含水量下降后进入平台期，随后持续下降，这是符合硅酸盐水泥水化过程的：首先，水泥与水混合后，水化反应剧烈发生，含水量持续下降；其后，水泥水化反应进入诱导期，含水量变化出现平台期，直到水泥初凝。最后，水泥继续水化，直至水泥终凝。由于天线的谐振频率受水泥含水率影响极大，因此，变化也呈现接近的趋势。

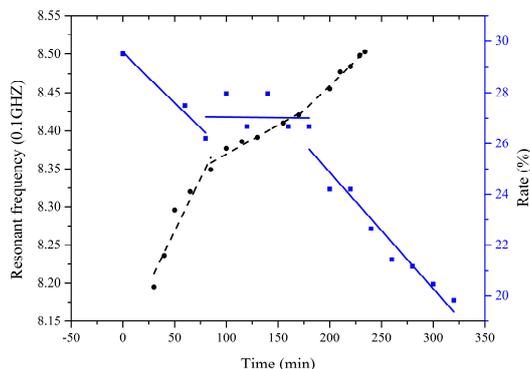


图8 含水率-谐振频率变化图

4.4.2 水泥净浆长效监测

对三组试块进行了截止6月10日为期七天的长效监测。天线谐振频率变化如图9所示：

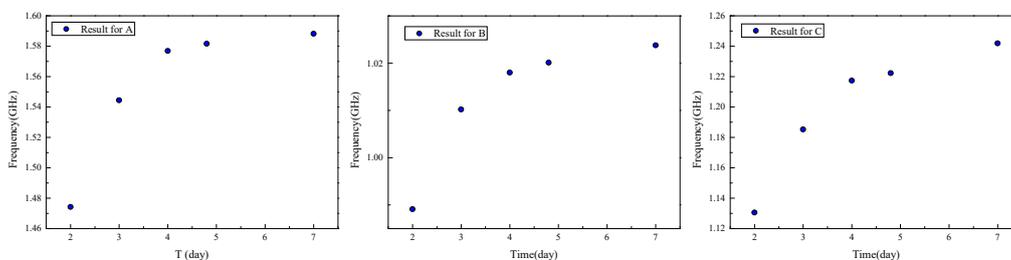


图9 三组试模长效监测图

如上图所示，谐振频率在七天内仍旧持续上升，这是由于水分的持续蒸发所导致的。三块贴片天线都表现出趋于极值的趋势，这是因为随着时间的推移，水泥净浆的含水率正逐渐趋于稳定。C组第七天谐振频率有加速上升的趋势，这可能是由于误差导致的。

误差可能来自于以下几个方面:

①.测量误差。在测量过程中, 由于操作问题, 可能会产生一定的误差;

②.含水量之外的因素在水泥水化过程中对谐振频率的影响。由前文可知, 天线谐振频率除了受含水量影响外, 还有可能受离子浓度、孔隙率等影响, 这些因素可能导致天线的谐振频率测量出现一定的误差。

5. 结论与展望

本文对基于贴片天线的水泥净浆的凝结状态监测和长效监测进行了一定的研究, 得到了以下三点结论:

①.仿真数据显示, 随着上覆物介电常数的提升, 贴片天线的谐振频率逐渐降低;

②.对 PO42.5 标号的水泥, 凝结状态时, 贴片天线的谐振频率与水泥净浆的含水率变化有相同的趋势;

③.在水泥净浆试块的长效监测中, 贴片天线谐振频率有趋于极值的趋势, 这与水泥净浆试块含水率变化趋势是相吻合的。

在后续的试验中, 将会优化试验环境, 进行重复试验; 同时, 长效监测和内部渗水监测也会进行。净浆试验探索完全时, 将开展基于贴片天线的混凝土凝结状态监测和长效监测。

致谢

本研究得到以下资助项目的支持:

资助项目: 政府间国际科技创新合作重点专项(编号: 2016YFE0127600);

同济大学工程结构服役性能演化与控制教育部重点实验室开放基金(编号: 2018KF-4);

中央高校基本科研业务费——学科交叉类项目。

参考文献:

- [1] Teng K H, Kot P, Muradov M, et al. Embedded Smart Antenna for Non-Destructive Testing and Evaluation (NDT&E) of Moisture Content and Deterioration in Concrete[J]. Sensors. 2019, 19(3): 547.
- [2] 曾力, 方坤河. 碾压混凝土凝结状态的快速判断[J]. 水力发电学报. 1995(02): 29-36.
- [3] 侯东伟, 张君, 孙伟. 基于早期变形特征的混凝土凝结时间的确定[J]. 硅酸盐学报. 2009, 37(07): 1079-1084.
- [4] Balanis C A. Antenna theory: analysis and design[M]. John wiley & sons, 2016.
- [5] Huang H. Antenna sensors in passive wireless sensing systems[J]. Handbook of Antenna Technologies. 2014: 1-34.
- [6] You K Y, Salleh J, Abbas Z, et al. A rectangular patch antenna technique for the determination of moisture content in soil[J]. Progress in Electromagnetics Research C. 2010: 850-854.
- [7] Tchafa F M, Huang H. Microstrip patch antenna for simultaneous temperature sensing and superstrate characterization[J]. Smart Materials and Structures. 2019.
- [8] 刘英, 唐杰伟, 刘剑波, 等. 碾压混凝土含湿率快速检测新方法与应用[J]. 水利水电施工. 2015(06): 80-83.
- [9] 孟雄号. 考虑氯化物影响的水泥混凝土介电常数模型的研究[D]. 华北水利水电大学, 2018.