

# 使用探地雷达对钢筋混凝土进行无损腐蚀检测：综述

安娜·塞尔达, 马里吉娜·泰西奇, 克森加·巴里切维奇

隶属: 克罗地亚土木工程学院材料系

**摘要:** 通过有效和全面的状况评估, 可以确保降低混凝土结构的维护成本。探地雷达 (GPR) 已广泛用于钢筋混凝土结构的状态评估, 它可以实时提供完全无损的结果。主要用于定位钢筋和确定混凝土保护层厚度。最近, 研究集中在使用 GPR 进行钢筋腐蚀评估的可能性。本文概述了 GPR 在混凝土腐蚀评估中的应用。文献检索和研究选择方法用于确定相关研究。首先, 此综述显示了实验室研究。之后, 介绍了在真实结构上的应用研究。结果表明, 实验室研究并未完全阐明腐蚀过程对 GPR 信号的影响。此外, 实验室研究结果与现场检查之间没有明确的关系。虽然探地雷达在结构状态评估方面有着悠久的历史, 但需要更多的实验室研究来阐明腐蚀的过程对探地雷达信号的影响。

**关键词:** 探地雷达 (GPR); 无损技术 (NDT); 钢筋锈蚀

## Non-Destructive Corrosion Inspection of Reinforced Concrete Using Ground-Penetrating Radar: A Review

Ana Serdar, Marijina Tesic, Ksenjia Baricevic

Affiliation: Department of Materials, Faculty of Civil Engineering, Croatia

**Abstract:** Reduced maintenance costs of concrete structures can be ensured by efficient and comprehensive condition assessment. Ground-penetrating radar (GPR) has been widely used in the condition assessment of reinforced concrete structures and it provides completely non-destructive results in real-time. It is mainly used for locating reinforcement and determining concrete cover thickness. More recently, research has focused on the possibility of using GPR for reinforcement corrosion assessment. In this paper, an overview of the application of GPR in corrosion assessment of concrete is presented. A literature search and study selection methodology were used to identify the relevant studies. First, the laboratory studies are shown. After that, the studies for the application on real structures are presented. The results have shown that the laboratory studies have not fully illuminated the influence of the corrosion process on the GPR signal. Also, no clear relationship was reported between the results of the laboratory studies and the on-site inspection. Although the GPR has a long history in the condition assessment of structures, it needs more laboratory investigations to clarify the influence of the corrosion process on the GPR signal.

**Keywords:** Ground-penetrating radar (GPR); non-destructive techniques (NDT); corrosion of reinforcement

### 引言:

每个结构都必须根据其预期用途进行设计和建造, 以便在其生命周期内满足结构的基本要求和其他要求, 即《建筑法》规定的条件。不幸的是, 经验表明, 由于机械和环境影响的共同作用, 许多混凝土结构仅在 20 到 30 年后就显示出明显的退化迹象。退化的原因主要是腐蚀的结果, 腐蚀在全球范围内将每年的维护成本增加到世界国内生产总值 (GDP) 的 3% 以上。仅欧洲桥梁的维护和加固就需要 2.15 亿英镑, 这还不包括改道和组织

交通的费用。不系统的维护方法, 尤其是基础设施的维护方法, 会导致其过早损坏, 并对安全性和可靠性产生负面影响。尤其令人担忧的是, 如今在维护和维修上投入的资源高于建设成本。因此出现了一个问题: 如何阻止或延缓全球基础设施的退化?

概述的问题引起的关注导致制定了减轻腐蚀过程后果的策略。在设计层面, 策略主要针对提高混凝土保护层在厚度和质量方面的耐久性能。其他策略旨在预防使用腐蚀抑制剂、耐腐蚀钢或其他表面处理。然而, 这些

解决现有结构腐蚀问题的能力有限。

延缓现有结构退化的最有希望的方法之一是广泛使用无损技术 (NDT)。增加检查频率和扩大检查区域的覆盖范围可以及时发现损坏情况, 总而言之, 可以做出更好的结构维护决策。在这方面, NDT 方法在结果可视化方面的进展导致未来更多地使用先进的 NDT 方法。目前有许多 NDT 方法可用; 然而, 本文侧重于探地雷达 (GPR) 在钢筋混凝土结构腐蚀检测中的应用。

最初, 雷达是为军事用途而设计的。如今, 其应用已扩展到土木工程、水文地质、考古等各个学科。当与其他无损检测方法结合使用时, 可以提高混凝土结构的状态评估的有效性和检查速度。实验室研究表明, 可以通过观察 GPR 信号的变化来监测腐蚀过程。此外, GPR 在评估腐蚀和腐蚀相关病理以进行现场检查方面有着悠久的历史。这两种方法的主要区别在于实验室研究主要集中在离散腐蚀表征上。现场调查基于对几个同时影响的观察, 即水分、氯化物的变化以及腐蚀产物和裂缝的形成。

以前的研究集中在审查 GPR 在土木工程中的一般应用, 或者集中在对特定类型的建筑进行现场检查。迄今为止, 还没有全面的批判性研究来评估 GPR 在钢筋混凝土腐蚀评估中的应用。本综述的主要目的是确定所有有关使用探地雷达对钢筋混凝土进行腐蚀评估的相关出版物。作者试图更多地了解实验室测试与 GPR 现场应用之间的关系。

### 一、使用探地雷达进行腐蚀监测

退化的主要原因主要是钢筋腐蚀的结果。钢筋在混凝土中的腐蚀是发生在钢筋表面的阳极和阴极反应之间的平衡电化学机制。阳极反应, 即铁的氧化, 发生在钢的保护性钝化膜不稳定的环境中。保护层的不稳定性与周围混凝土的变化有关, 这些变化的主要原因是氯化物渗透或碳化等过程。在 Tuutti 腐蚀模型中, 钝化膜破裂所需的时间称为起始期。腐蚀的进一步发展称为传播期, 并涉及裂纹萌生, 这是由于锈形成引起的钢筋周围的膨胀应力的结果。逐渐腐蚀导致混凝土剥落和钢筋横截面的减少, 这可能会损害结构的承载能力。大多数腐蚀评估技术都是基于电化学的。在腐蚀概率的现场评估中, 半电池电位 (HCP) 和电阻率 (ER) 是最常用的。

ASTM C876 和 RILEM 建议中给出了半电池方法的描述和结果的解释。Wenner 探头通常用于确定电阻率。电阻率值可用于估计腐蚀风险。尽管这些方法长期以来一直成功地用于混凝土结构的状态评估, 但它们也存在一

些缺点。半电池电位是一种半破坏性技术, 因此它需要连接到增强体。当要检查大面积时, 这是一个限制。测量电阻率不提供有关钢筋的信息, 仅提供有关腐蚀环境的信息。此外, 大面积的检查需要大量时间。这些问题可以通过使用 GPR 来克服。

探地雷达是一种将电磁波发射到材料中的非破坏性技术, 主要目的是定位地表下的埋藏物体。如今, 它的范围扩大到广泛的材料, 其中包括混凝土。发射的电磁波通过主体材料传播, 直到它遇到不同材料之间的界面, 然后它被反射回来。用于土木工程调查的主要 GPR 天线类型是空气耦合和地面耦合。第二种意味着天线与地面接触, 具有更好的穿透深度。反射波用接收天线记录下来, 这种记录称为 A 扫描。发射波时, 接收器首先记录从发射器通过空气传播到接收器的直接波。然后, 一部分电磁波被材料表面反射。在地耦合系统中, 这两个分量叠加形成波, 称为直接耦合。其余的波能穿过材料, 直到到达具有不同介电特性的材料。然后电磁波被反射, 接收器将其记录为反射波。因此, 提供有关目标信息的 A 扫描属性是反射波的幅度和从发射器到接收器的传播时间。此外, 使用 GPR 获得的结果最常见的表示是 B 扫描, 即表示沿线调查区域的二维切片。

反射波的强度取决于主体材料的特性。决定材料中电磁波行为的特性是其介电特性——介电常数 ( $\epsilon$ ) 和电导率 ( $\sigma$ )。信号损失主要是由于导电和介电弛豫造成的。电导源于自由电荷的运动, 而介电弛豫源于极性分子的旋转。在微观尺度上, 由于这些运动, 粒子之间会发生摩擦, 导致能量耗散。总之, 电磁波的传播行为很大程度上取决于孔隙溶液的成分。在混凝土中存在水分和/或氯化物的情况下, 可以预期介电性能会发生变化。孔隙中水分子和氯化物的存在导致能量和信号的整体损失。然而, 这种衰减主要是由于混凝土电导率增加而导致孔隙溶液中存在氯化物。由碳化引起的混凝土微观结构的变化也会影响 GPR 响应。最明显的是由于孔隙溶液中孔隙率和离子交换的减少。据报道, 碳酸化会导致介电常数降低, 从而导致衰减降低。

### 二、实验室模拟腐蚀检测

使用探地雷达进行腐蚀评估仍然是一种新颖的方法, 因此在实验室条件下进行的研究数量有限。从腐蚀起始、腐蚀监测和腐蚀概率评估的标准开始, 确保为此类研究提供合适的实验设置存在许多挑战。为了模拟实验室条件下的自然腐蚀, 常采用各种技术来加速这一过程, 如外加电流技术、人工气候环境、加速迁移试验等。腐蚀

加速最常用的方法是外加电流技术, 它基于将嵌入式钢筋暴露在外部电源提供的电流下。控制电流密度和暴露时间以实现不同程度的腐蚀。此外, 通过创造有利的条件, 如高温、高湿和干湿循环, 可以增强腐蚀。即使这些方法倾向于很好地模拟腐蚀, 发生腐蚀的人为条件也不可避免地与自然条件不同。认识到这些限制对于确保加速腐蚀调查和使用 GPR 的现场腐蚀评估之间的充分关联非常重要。

### 三、长期腐蚀监测

对腐蚀的长期监测可以确保更好地了解其对 GPR 信号属性的影响。已经进行了几项研究来区分和关联腐蚀发展和 GPR 信号的重要属性。这些研究的结论分为: (1) 初始阶段, (2) 裂缝的形成和 (3) 混凝土覆盖层的剥落。

(1) 启动阶段: 由于电势梯度, 在加速腐蚀过程中施加电流会引起氯离子更快的运动, 这种机制称为迁移。随着这一过程的蓬勃发展, Lai 等人报道了 GPR 幅度的降低。根据作者的断言, 氯离子在阳极周围的积累吸收了电磁波的能量, 这也导致了波的延迟。

(2) 裂缝的形成: 在启动阶段之后, 研究人员注意到信号属性的变化趋势稳定, 直到混凝土表面出现宽裂缝。这个阶段的特点是腐蚀产物的形成, 这些腐蚀产物会迁移到周围的混凝土中。报告了反射波的振幅增加。钢筋受到外部电源的影响, 直到混凝土表面出现纵向裂缝。作者声称腐蚀产物迁移到较浅的混凝土覆盖区扩大了信号与不同界面(混凝土、微裂纹、腐蚀产物)的交点, 并导致幅度增加。在一项研究中, 该实验旨在排除水分和氯化物对 GPR 信号的影响。在加速腐蚀之前, 将样品储存两个月以达到稳定的水分和氯化物含量。在这里, GPR 信号幅度的增加仅归因于腐蚀的影响。

(3) 剥落: Lai 等人还注意到除了腐蚀发展对 GPR 幅度的影响外, 裂纹扩展和宽裂纹的出现对 GPR 信号幅度的影响。在出现宽的纵向裂纹后观察到振幅减小。这可以通过当宽裂缝传播通过混凝土覆盖层时由额外的不规则性引起的信号能量的散射来解释。提出了实验装置的扩展, 以更好地表示裂纹对信号幅度的影响。

### 四、现场腐蚀检查

大多数已发表的研究都集中在 GPR 在桥面评估中的应用, 而其他结构的代表性较小(隧道、建筑物、码头等)。就地理位置而言, 大多数使用 GPR 的研究都是在美国进行的。

使用探地雷达数据对混凝土桥梁进行状况评估可以

追溯到 1980 年代初期。检查期间探地雷达信号的幅度受结构元素的存在、覆盖层深度的变化、水分、氯化物和其他变量的影响。因此, 评估 GPR 信号变化的简单方法是不切实际的。与其他现象的共存影响, 例如水分和氯化物的变化, 是不可避免的, 并阻碍了直接定位腐蚀钢筋的方法的发展。因此, 使用间接方法, 其中腐蚀区域的定位与高信号衰减区域相关。已发现衰减与由累积的氯离子和腐蚀产物引起的钢筋周围电导率增加密切相关。

混凝土桥墩和码头的检查与桥面的检查非常相似, 其中水分和氯化物是劣化的主要原因。在隧道检查中也有报道使用探地雷达。值得注意的是, 这些结构的复杂设计和复合劣化机制使得简单的腐蚀评估变得不可能。相反, 这些数据被用来评估整体状况。衰减的量化可以通过信号的数值分析或通过 B 扫描的视觉分析来确定。这些将在以下各节中更详细地讨论。

### 五、基于视觉或组合的 GPR 属性分析

视觉方法意味着 B 扫描的视觉分析。这种方法高度依赖分析人员的专业知识, 特别是在结构严重受损的情况下, 因此结论容易出错。正如一些作者所指出的, 幅度的数值分析误解了大多数改变信号的异常情况, 而不是恶化的原因(表面异常、钢筋间距、钢筋深度、结构变化)。由于这些缺点, 提出了一种方法, 其中分析人员审查探地雷达剖面(B 扫描), 考虑钢筋和混凝土表面的反射并标记恶化区域的边界。轮廓被处理, 最终输出是腐蚀图。改进了该方法以克服分析人员在基于视觉的解释中的主观意见。创建了一组 if/then 规则来定位改变信号但不表示恶化的异常。Dinh 等人使用探地雷达剖面的视觉分析作为工具来确定条件类别的数量作为 k-means 聚类方法的输入。它是一种组合方法: 在确定条件类别的数量后, 对信号的幅度进行分组, 并确定组间的阈值。以这种方式获得的腐蚀图用于混凝土桥面的劣化建模。Dawood 等人提出了一种改进的基于视觉的探地雷达数据分析, 用于检测隧道中的空气和水空隙。

### 六、多重无损检测相结合的状态评估

与其他无损技术(NDT)相比, 探地雷达具有许多优势, 因此它对取代其他技术表现出极大的兴趣也就不足为奇了。它是完全无损的, 将其优先于其他使测量速度缓慢且效率较低的技术是合理的。在接下来的部分中, 简要概述了通过将 GPR 数据与其他测试方法(如电阻率(ER)、半电池电位(HCP)、链阻力(CD)、锤探法(HS)进行比较)获得的当前研究结果)、红外热成像

(IRT)、声发射 (AE) 和冲击回波 (IE)。

电阻率和半电池电位是确定混凝土结构状况评估中腐蚀概率的基本工具。在电阻率和 GPR 数据的分析中发现了良好的相关性。然而, 这种行为是意料之中的, 因为这两种技术都受到混凝土电导率的影响。关于 HCP 和 GPR 数据之间的比较, 所有观察结果都是通过叠加信号衰减和电位图来获得的。在大多数研究中, 发现了良好的相关性, 因为衰减指示腐蚀环境并且与极负半电池电位的区域一致。然而, 当劣化程度较低时, 探地雷达可能会高估腐蚀区域。

其他技术也可以用于状态评估并正确预测由于腐蚀传播引起的潜在恶化。这些技术包括拖链 (CD)、锤探 (HS)、红外热成像 (IRT)、声发射 (AE) 和冲击回波 (IE)。与链拖法相比, 探地雷达有效, 劣化程度在 10% 到 50% 之间。由于探地雷达一般比声学系统更早地检测到恶化, 因此高衰减区域大于声学系统检测到的分层区域。GPR 可以在分层发生之前检测到劣化。此外, 基于 ROC (接收器工作特性) 分析的探地雷达 (GPR) 和红外热成像 (IRT) 对分层检测的比较可行性研究表明, IRT 在检测分层方面比 GPR 更可靠。然而, IRT 的贡献仅限于较浅的覆盖深度, 而 GPR 可以提供更深入的洞察力。此外, 还研究了 GPR 在预测修复数量方面的有用性, 其中探地雷达的结果与水力爆破后 LiDAR (光探测和测距) 方法测量的拆除深度相匹配。

在一项非常详细的研究中, Omar 等人介绍了最常用的混凝土桥梁状况评估方法的弱点和优势。结论是, 没有一种常用的技术可以同时检测到主动腐蚀、分层和垂直裂纹, 因此最可靠的状态评估在于多种技术的组合。这种方法确保了准确的状态评估, 因为可以检测到从开始到晚期的恶化。

同时, 使用的无损技术通常考虑探地雷达、电阻率、半电池电位、超声波表面波和冲击回波等方法。此外, 还有一个在机器人系统中集成不同无损检测方法的示例, 名为 RABIT (机器人辅助桥梁检测工具), 可确保混凝土桥面状况的实时可视化。在这里, 评估得到了 Jensen-Shannon 概率方法的支持, 该方法侧重于条件指数的确定。红外热成像 (IRT) 可为解释分层检测的 GPR 数据提供额外支持。Solla 等人展示了检查处于腐蚀晚期的军事基地的技术, 该技术具有明显的损坏迹象, 例如开裂和剥落。用 GPR 获得的结果与 IRT 技术相结合。腐蚀评估基于对 GPR 信号衰减、信号速度变化和幅度极性的观察。总体而言, 高信号衰减被宣布表明存在矿物盐和水

分, 而反向反射极性可能是空隙的标志。尽管腐蚀过程在这种情况下有所不同, 但在废水处理厂的评估中使用了相同的参数。

Alani 等人进行了劣化建模的评估, 其中有限元模型是根据探地雷达和偏转和振动传感器系统的输入构建的。结合探地雷达、半电池电位法、电阻率法和冲击回波法的结果, 建立了桥面评价数据融合模型。此外, 将探地雷达数据结合电容技术和冲击回波方法与码头整体评估的耐久性指标相关联。

### 结论

本文研究了利用探地雷达对混凝土腐蚀概率的评价。该研究分析了实验室和现场调查, 结果与腐蚀过程的演变有关。未来研究的优点和建议如下。

GPR 是一种完全非破坏性的方法, 与其他用于钢筋混凝土腐蚀评估的技术相比, 它具有优势。它能够在短时间内检查大面积区域, 并提供有关钢筋深度和间距的信息, 使其成为多功能 NDT。文献综述确定了使用探地雷达进行腐蚀评估的某些挑战, 主要挑战之一是了解具体条件对探地雷达参数的影响。事实上, 在大多数实验室研究中, 水分和氯化物含量是在增强体去钝化后控制的。在实际条件下的现场, 水分和氯化物含量的变化是不可避免的, 这使得仅基于振幅观察的腐蚀区域的检测可能不明确。由于文献中报道了相反的数据, 因此需要进一步的实验室研究来显示混凝土覆盖层的介电性能变化对探地雷达振幅的影响以及由于腐蚀产物的形成及其迁移而导致的反射系数变化。由于实验设计的差异和加速腐蚀过程引起的损伤程度, 研究的绝对比较是困难的, 进一步的研究应该将损伤程度与探地雷达振幅的变化联系起来。从提议的研究课题中获得结论性结果可以使 GPR 成为检测腐蚀区域的独立工具, 从用于检测腐蚀环境转向检测腐蚀本身。总之, 随着对腐蚀对 GPR 信号影响的了解增加, GPR 将成为钢筋混凝土结构状态评估的非常有价值的工具。这种方法肯定会得到改进, 从而导致施工管理系统的升级, 使评估更加可靠, 同时降低维护成本。

### 参考文献:

- [1]Scott, M.; Rezaizadeh, A.; Delahaza, A.; Santos, C.G.; Moore, M.; Graybeal, B.; Washer, G. A comparison of nondestructive evaluation methods for bridge deck assessment. *NDT E Int.* 2003, 36, 245 - 255.
- [2]Maser, K.R. Integration of ground penetrating radar and infrared thermography for bridge deck condition testing.

In Proceedings of the NDTCE' 09, Non Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France, 30 June - 3 July 2009.

[3]Gucunski, N.; Maher, A.; Ghasemi, H. Condition assessment of concrete bridge decks using a fully autonomous robotic NDE platform. *Bridg. Struct.* 2013, 9, 123 - 130.

[4]Alani, A.M.; Aboutalebi, M.; Kilic, G. Integrated health assessment strategy using NDT for reinforced concrete bridges. *NDT E Int.* 2014, 61, 80 - 94.

[5]Abu Dabous, S.; Yaghi, S.; Alkass, S.; Moselhi, O. Concrete bridge deck condition assessment using IR Thermography and Ground Penetrating Radar technologies. *Autom. Constr.* 2017, 81, 340 - 354.

[6]Omar, T.; Nehdi, M.L.; Zayed, T. Rational Condition Assessment of RC Bridge Decks Subjected to Corrosion-Induced Delamination. *J. Mater. Civ. Eng.* 2018, 30.

[7]Ahmed, M.; Moselhi, O.; Bhowmick, A. Two-tier data fusion method for bridge condition assessment. *Can. J. Civ. Eng.* 2018, 45, 197 - 214.

[8]Solla, M.; Lagüela, S.; Fernández, N.; Garrido, I. Assessing rebar corrosion through the combination of nondestructive GPR and IRT methodologies. *Remote Sens.* 2019, 11, 1705.

[9]Kilic, G.; Caner, A. Augmented reality for bridge condition assessment using advanced non-destructive techniques. *Struct. Infrastruct. Eng.* 2020.

[10]Rashidi, M.; Azari, H.; Nehme, J. Assessment of the overall condition of bridge decks using the Jensen-Shannon divergence of NDE data. *NDT E Int.* 2020, 110.

[11]Omar, T.; Nehdi, M.L.; Zayed, T. Performance of NDT Techniques in Appraising Condition of Reinforced Concrete Bridge Decks. *J. Perform. Constr. Facil.* 2017, 31.

[12]Gucunski, N.; Basily, B.; Kim, J.; Yi, J.; Duong, T.; Dinh, K.; Kee, S.H.; Maher, A. RABIT: Implementation, performance validation and integration with other robotic platforms for improved management of bridge decks. *Int. J. Intell. Robot. Appl.* 2017, 1, 271 - 286.