

論文の内容の要旨

専攻名 システム創成工学専攻

氏名 江里口 玲

1980年代に荒廃するアメリカで示された社会インフラの老朽化問題は、2000年代に入り各所で顕在化している。日本国内においても2012年の笹子トンネル天井版崩落事故において、9名の人命が失われ、インフラ老朽化が大きな社会問題として認識された。老朽化の進むインフラが増加する一方で、労働人口の減少が著しい我が国では、インフラを健全に維持するための効率的かつ省力的な維持管理手法が求められている。

近年、センサを活用した点検・診断技術がいくつか提案されているが、その多くは熱電対やひずみゲージと同様に計測機と有線で接続して利用する有線センサである。有線センサは実験的な活用から実構造物まで広く利用されているものの、センサのケーブル自身が風雨にさらされることや紫外線で劣化することから、コンクリート構造物のライフサイクルに見合う長期耐久性の確保は困難である。特に鉄筋腐食を対象とした維持管理への活用を想定すると、数年から数十年といった耐久性を確保できることが望まれており、有線ケーブルを使うセンサでは実用的とはいえない。

本研究においては、特に鋼材腐食に着目して既往の手法の課題に対して独自に腐食環境を評価するシステムを開発した。本研究で開発したセンサについては、センサ自身が腐食により破断し、電気抵抗が急峻に上昇する現象を捉えることを想定し、鉄箔によるセンサ構造を検討した。

センサ性能の確認として、塩化物イオンを混入させたモルタルおよびコンクリート中におけるセンサの電気抵抗の挙動を把握することに加え、塩化物イオン量とセンサ抵抗の挙動の關係に着目し、コンクリート模擬溶液内の塩化物イオン量の変化に伴う検知性能を確認した。

また、開発した鉄箔センサをはじめ各種のセンサ技術を使ったコンクリート構造物の維持管理を実用面から捉え、センサの通信インターフェースとしてパッシブ型RFIDの適用を検討した。パッシブ型RFIDは近接無線技術のなかでも、電源を要しないという特長を有しICカードをはじめ様々な用途で普及しているが、センサを接続した通信インターフェースとしての適用事例は極めて少ない。電源を要しないため、コンクリート内部に埋設しても電池交換や充電が不要で長期的な供用が期待できるが、実際に構造物内部に埋設して確認した事例はない。そこで、センサとパッシブRFIDを接続して構築したシステムにおける耐久性評価として、RFIDモジュールを搭載したセンサシステムを塩水噴霧と温度サイクルを付与した促進耐久性試験をはじめとした各種耐久性試験を行うとともに、実構造物に適用し10年間を超える継続的なモニタリングにより実用性を評価した。更に、RFIDの応用手法としてコンクリート工事に広く使われるモルタルスペーサにRFIDタグを内蔵し、RFIDをコンクリート内部に設置する際の安全性や設置し易さを提案した。RFIDタグを内蔵したモルタルスペーサについては、その通信指向性を利用した簡易的なかぶり厚検査へ

の適用を検討し、実用的なシステムとして構築し提案した。

以下に、各章の概要を示す。

第1章では、社会背景としてインフラ老朽化事例とともに国内のインフラがどのような状況におかれているかを俯瞰し、その対策の必要性を示した。加えて、既往の研究より日本国内の労働人口減少が橋梁の維持管理に与える影響と展望を示し、インフラ維持管理技術の省力化・効率化が求められる背景を概説した。

第2章では、従来のコンクリート構造物の検査技術とセンサ技術の比較を行い、センサ技術の求められる領域とセンサ技術の課題を整理した。特に鉄筋腐食を対象としたセンサは求められているが、既往の研究や実用化されたセンサのサイズや、耐久性に懸念があり、無線化と無電源化が実現することで、実用的なシステムを構築できることを示した。

第3章では、鉄筋腐食センサとして「鉄箔」に着目し、鉄箔で構成される腐食環境センサを検討した。更に、鉄箔センサの検知性能を確認するため、コンクリート模擬溶液中にて塩化物イオン量500ppmで反応することを確認し、既往のセンサと比較して優れた感度を有することを示した。また、センサと鉄筋を埋設したコンクリート試験体で塩分浸透試験を行い、従来手法である自然電位法とセンサが同等の腐食検知性能であることを確認した。加えて、鉄箔センサの応用可能性として、犠牲陽極方式の電気防食工法に対する維持管理方法への適用実験と、腐食の進展が確認できる静電容量型腐食面積センサへの適用可能性を示した。

第4章では、実際のコンクリート構造物に適用できる診断システムとして、パッシブRFIDとセンサを接続したシステム構築を検討した。パッシブRFIDを通信インターフェースに適用することで、無線化と電源レスを実現できることから、既往のセンサで懸念されるケーブルの耐久性や、バッテリー切れ等の懸念が生じず、長期間の供用に耐えうるシステムとなる。システムの実用化に向けて、RFIDの温度特性やA/D変換性能を考慮した回路設計とともに、個体差を回避するための補正式を見出し、補正式を実装したソフトウェアを開発し、実用的な診断システムを構築した。また、診断システムの実用性を評価するために従来の有線センサとの比較検証を行った。特に長期の維持管理に必要な耐久性については各種の試験とともに、実構造物への適用結果として10年間にわたる定期計測を実施し、その効果を確認した。

第5章では、RFIDの機能を活用した新たな手法の提案として、RFIDを埋設したモルタルスペーサを作成し、コンクリートに悪影響を与えず良好な施工性を有したデバイスを提案した。併せて、RFIDを埋設したモルタルスペーサの通信指向性を利用した新たななかぶり検査手法を構築した。将来的なRFIDの活用可能性として、RFIDの反射電波強度の挙動からコンクリートの強度発現を推察する手法の可能性を示した。