

RFID 技術を活用したコンクリート構造物の診断技術の構築と
実用化に関する研究

工学研究科博士後期課程
システム創成工学専攻
江里口玲

目 次

第 1 章	序論	5
1.1	本研究の背景.....	5
1.2	インフラの老朽化事例.....	7
1.3	労働人口の減少が社会インフラに与える影響	9
1.4	本研究の目的.....	10
1.5	本論文の構成.....	13
第 2 章	コンクリート構造物の診断・モニタリング技術	16
2.1	コンクリート構造物の診断方法	16
2.2	代表的な破壊検査	17
2.3	コンクリート構造物の非破壊検査技術	18
2.4	各種センサによるコンクリートの計測	19
2.5	鉄筋腐食を対象としたセンサ技術.....	21
2.5.1	既往の鉄筋腐食センサ.....	22
2.5.2	鉄筋腐食センサの課題.....	26
2.6	センサ技術の実用化に向けた課題解決と期待	30
2.7	第 2 章のまとめ.....	30
第 3 章	センサを活用したコンクリートの診断技術	34
3.1	鉄筋腐食を対象とした新たなセンサの検討	34
3.1.1	鉄線方式腐食センサの性能	34
3.1.2	鉄膜方式の腐食センサの性能.....	35
3.1.3	既往の鉄筋腐食の評価手法	35
3.2	鉄箔を用いた腐食センサの開発	36
3.2.1	鉄箔センサの厚みの検討	37
3.2.2	鉄箔センサの腐食判定を行う抵抗値の検討.....	38
3.2.3	模擬溶液による鉄箔センサの腐食検知性能試験.....	42
3.2.4	塩分を練りこんだモルタル内の鉄箔センサの性能検証.....	45
3.2.5	コンクリート内部における鉄箔センサの性能検証.....	48
3.3	鉄箔センサの外装・筐体の検討	51
3.4	電気防食工法における犠牲陽極モニタリングセンサへの応用検討.....	52
3.5	鉄箔センサを活用した腐食面積の評価手法への活用	64
3.5.1	静電容量型腐食センサの測定原理	65
3.5.2	静電容量型腐食センサの性能評価	66

3.5.3	センサの静電容量の計測結果.....	67
3.6	第3章のまとめ.....	68
第4章	センサインターフェースを有するRFIDを活用した診断技術.....	72
4.1	RFIDの種類と活用方法.....	72
4.1.1	RFIDの活用事例.....	74
4.1.2	センサインターフェースを有するRFID.....	76
4.2	グラウト充填検知システムの検討.....	77
4.2.1	センサとの接続による課題解決と実用化.....	78
4.2.2	RFID基板の保護.....	78
4.2.3	センサと接続したRFIDシステムの使用法.....	79
4.2.4	コンクリートに埋設した際の通信特性.....	80
4.3	各種センサを接続するための検討.....	81
4.3.1	センサインターフェース付RFIDの温度特性.....	81
4.4	RFIDひずみ計測システムの開発.....	83
4.4.1	コンクリート構造物におけるひずみ計測手法の課題.....	83
4.4.2	RFIDひずみ計測システムの概要.....	83
4.4.3	RFIDひずみ計測システムの制御ソフトウェア.....	84
4.4.4	RFIDひずみ計測システムの性能.....	85
4.4.5	RFIDひずみ計測システムの適用事例と計測結果.....	86
4.4.6	RFID腐食環境検知システムの概要.....	90
4.4.7	腐食センサの構造.....	91
4.4.8	RFID腐食環境検知システムの計測ソフトウェア.....	91
4.4.9	RFID構造物診断システムの耐久性.....	92
4.5	実構造物における長期供用性の確認.....	93
4.5.1	モニタリング対象の構造物.....	93
4.5.2	比較した鉄筋腐食を検知する各種センサ.....	93
4.5.3	各種センサの設置.....	94
4.5.4	計測方法と計測項目.....	96
4.5.5	計測結果.....	96
4.6	第4章のまとめ.....	101
第5章	RFIDの機能を活用した応用と今後の可能性.....	105
5.1	RFIDをコンクリートに投入する既往の検討.....	105
5.2	RFIDを埋設したモルタルスペーサ.....	106
5.2.1	スペーサに埋設するRFIDタグの諸条件.....	106

5.2.2	RFID タグのモルタルスぺーサへの埋設と破壊強度の確認	107
5.2.3	RFID タグの読み取りに用いるリーダーライタ	108
5.2.4	RFID タグを埋設したモルタルスぺーサの通信距離と通信指向性	110
5.2.5	通信指向性と通信距離の計測結果	111
5.3	RFID タグを埋設したスぺーサのかぶり厚検査システムの構築	113
5.3.1	かぶり厚検査用ソフトウェアの検討	114
5.4	RFID タグを埋設したスぺーサのかぶり厚検査システム以外の活用方法	115
5.4.1	コンクリート製品製造・施工情報管理システム	115
5.4.2	目視点検結果管理システムへの活用	115
5.5	RFID タグを埋設したモルタルスぺーサの活用に関するまとめ	116
5.6	RFID の反射電波強度を応用した検討	117
5.6.1	コンクリート硬化状態の把握方法の検討	117
5.6.2	コンクリートに埋設した RFID タグの電波強度	118
5.6.3	電波強度の計測結果と考察	120
5.7	第 5 章のまとめ	123
第 6 章	総括	126
6.1	本研究の結論	126
6.2	本研究の将来に向けた普及への期待と展望	128
【謝 辞】	129

第1章 序論

1.1 本研究の背景

我が国の社会インフラは、1960年代から整備が始められ、図 1-1 に示すとおり高度成長期を経て1995年頃に建設投資のピークを迎え、多くの社会インフラが整備されてきた。建設投資は、その後、徐々に右肩下がりとなったが、2000年代までの継続的な建設投資によって、多くの土木構造物が建設され、近代的な社会インフラの充実が図られた¹⁾。

2000年代以降は、政策的にも建設投資への抑制が図られたこともあり、新設構造物は徐々に減少し、新設を中心とした建設投資から維持管理費用に向けた政策転換が行われた。一方、2011年に起きた東日本大震災を含め、激甚化する自然災害が年々増加していることから、維持管理投資が、結果として災害対策に向けられる部分も多く、長寿命化や老朽化対策等の純粋な維持管理予算が増加してるとは言い難く、横ばい状況といえる。

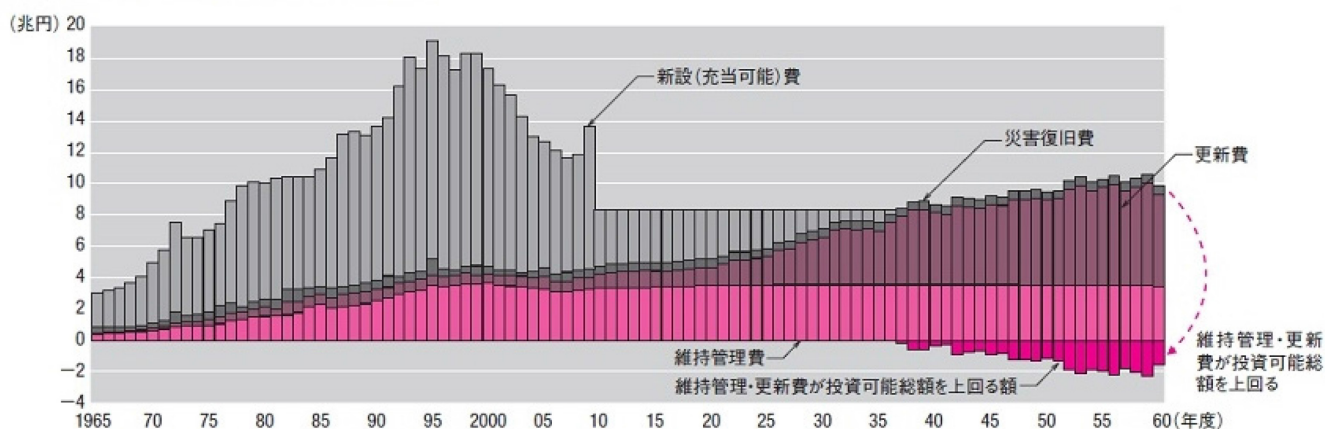


図 1-1 建設投資の推移と内訳

このような状況において、政府は2013年より社会インフラの老朽化に対する各種の施策を矢継ぎ早に実施してきた。特に社会インフラの維持管理における効率化・省力化については、新しい技術開発を推進するとともに、その成果の社会実装を目指していくことを明確にしている。政策面では、内閣府のインフラ長寿命化基本計画が基本政策となり、各省庁単位と地方自治体において具体的な行動計画の立案と実行が進められている。技術開発面では、内閣府が主導している「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)」において、全11課題の中に「インフラ維持管理・更新マネジメント技術」を取りあげられ、3年間で100億円以上の予算を投じている。

SIP では、2020 年を目処に重要インフラの 20%を対象として、ICT(Information and Communication Technology)とロボット技術をベースとしたインフラマネジメントによる予防保全を実現するとしている²⁾。

また、法律面では、2014 年に重要構造物の点検要領が制定されるとともに、構造物別の点検および診断業務について、関連民間資格の登録制度が開始されている。2016 年 4 月には、国土交通省より「i-Construction」と銘打った建設業界全体の業態改善ともいうべき方向性が示され、ICT の全面的な活用、規格の標準化、施工時期の平準化を行うことで、建設現場における生産性の向上はもとより、安全性の確保や建設従事者の処遇改善といった面まで長きに渡り慣習化した業界全体の課題へ踏み込んだ検討を開始した³⁾。

SIP のインフラ維持管理・更新・マネジメント技術の開発においては「点検・モニタリング・診断技術点検技術」というテーマを掲げ、多くの技術について研究開発が推進されたが、社会実装という段階まで至っている技術は決して多くはない。その理由として、インフラは数十年に渡り、劣化が徐々に進むことから短期間で導入効果を明らかにする事が困難である事や、研究された各技術の多くが、高度かつ高コストな技術であり、実際に大半の社会インフラを管理している地方自治体では、財政面の課題や技術者不足の点から、導入ハードルが決して低くはないことが理由として挙げられる。

これらのことから、社会インフラの老朽化に対しては、ある程度の経済合理性を考慮した技術の選定と省力的な維持管理方法が必要であり、加えて、SIP の研究目的に掲げられているように、事後保全型維持管理から予防保全型維持管理への移行が成し遂げられる技術が求められる。

特に費用面においては、図 1-2 に示す国土交通省の推計によると、今後の維持管理・更新を「事後保全」により行った場合、30 年後にその費用は約 2.4 倍増加し、「予防保全」に転換した場合、約 1.3 倍増加するとされている。また、予防保全型維持管理は、事後保全と比較して、1 年あたりの費用は約 5 割縮減するとされており⁴⁾ 予防保全型の維持管理を行う事で、長期にわたりライフサイクルコストが低減されることが期待される。

一方、予防保全型の維持管理を実現するうえでは、各々の社会インフラの劣化予兆を的確に捉える必要があり、そのためには各種のセンシング技術やモニタリング技術に加え、蓄積されたデータを用いて AI 技術を適用した劣化予測技術の実用化が期待されている。

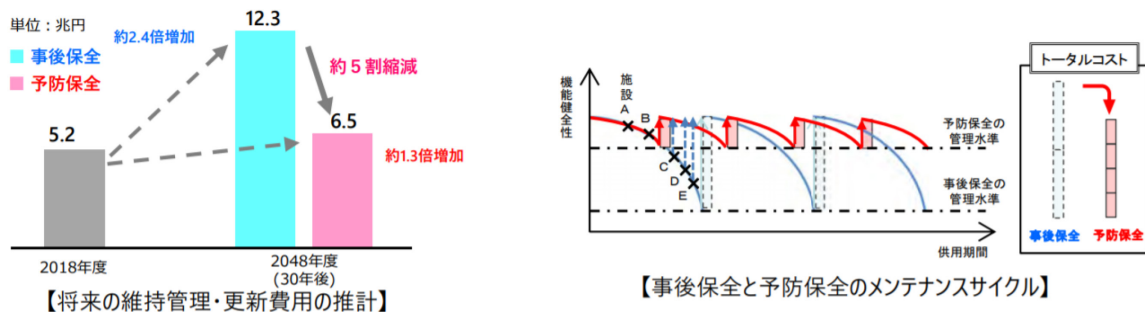


図 1-2 事後保全型維持管理から予防保全型維持管理へ移行した場合の効果⁴⁾

1.2 インフラの老朽化事例

国内における社会インフラの老朽化については、2012年12月に起きた中央高速自動車道における笹子トンネル天井板崩落事故⁵⁾を契機に顕在化されたと言われているが、その以前より老朽化に関わる問題が各所から提起されている。

特に米国では1980年代から「荒廃するアメリカ」に代表されるようにインフラ老朽化の顕在化が叫ばれ、P. Choate & S. Walter が「America in Ruins」⁶⁾を出版し警鐘を鳴らしていた。それから約30年が経過した2007年にミネアポリス州間高速道路35W号線(I-35W)ミシシッピ川橋が崩落し、自動車が約60台転落し、13人の尊い命が失われ、世界に衝撃を与えている。欧州においても2018年8月にイタリア・ジェノヴァのモランディ橋の落橋事故⁷⁾が起こり、43人の死者が発生している。建築分野においても2021年にアメリカのフロリダ州マイアミ近郊の12階建てサーフサイド・コンドミニアムの崩落事故で98人が死亡した。このように、先進国を皮切りに社会インフラの老朽化による悲劇が繰り返されているが、今後も同様に老朽化を起因とした、事故事例は各国で顕在化されることが懸念される。

老朽化事例を伝える情報の多くは、橋梁の落橋事故が多く取り上げられるが、それは規模が大きいことや、死傷者が生じることが多い点、インパクトが大きくニュースバリューが高いことからと想定される。しかしながら、実際には橋梁以外にも多くの構造物において、老朽化事例や事故が散見されている。例えば、コンクリート剥落事故については、橋梁下面のかぶりコンクリートが剥落する小規模な事故は第三者被害に至るケースは少ないものの、数多く発生している。また、最近では道路の陥没や盛土の劣化による土砂崩れ等、多くの事故事例が老朽化に起因して発生している。

前述したとおり笹子トンネルの天井板崩落事故は、国民に衝撃を与えた事案であり、9人の命が失われたこの事故を契機に、インフラ老朽化が社会問題とし

て認識されたことから、社会インフラの老朽化対策として、次々と具体的な政策が立案・実行されるに至った。政策の中で骨子となったのは「インフラ長寿命化計画」であり、その計画立案と実行は中央省庁主導で進められ、市町村レベルで管理している社会インフラの老朽化の現状についても明らかにしたといえる。

国内の社会インフラ多くは、1955～1973 年の高度経済成長期に整備されており、表 1-1 に示すとおり、すでに 50 年を経過したインフラが半数近くに達している。今後も建設後 50 年を経過する構造物は増加の一途をたどり 2040 年には橋長 2m 以上の橋梁で 75%が、トンネルは 53%が 50 年を超える見込みである。これらのインフラは、すべてが社会資本として維持され続けるとはいえないものの、2000 年まで建設投資が継続的に増加傾向であったことを踏まえると、今後も 50 年を経過する建造物が 40 年間増加し続ける可能性があり、次の世代に大きな負担として残すこととなる。

表 1-1 社会インフラの老朽化の現状⁸⁾

分野	施設	2020 年 3 月時点	2030 年 3 月時点	2040 年 3 月時点	施設数
道路	橋梁（橋長 2m 以上）	30%	55%	75%	726,461 橋
	トンネル	22%	36%	53%	11,350 本
河川・ダム	河川管理施設	10%	23%	38%	45,763 施設
砂防	砂防堰堤、床固工	34%	53%	71%	119,247 基
海岸	海岸堤防等	46%	61%	77%	約 5,900km
下水道	管渠	5%	16%	35%	482,517km
港湾	港湾施設	21%	43%	66%	61,084 施設
空港	空港	43%	60%	73%	95 空港
鉄道	橋梁	55%	71%	85%	125,047 橋
	トンネル	66%	83%	91%	4,897 本
自動車道	橋	68%	92%	92%	115 橋
	トンネル	88%	100%	100%	8 本
航路標識	航路標識	19%	34%	51%	5,155 基
公園	都市公園等	9%	26%	46%	111,366 施設
公営住宅	公営住宅	16%	48%	68%	2,153,815 戸
官庁施設	官庁施設	13%	29%	45%	47,896 千㎡

※建設後 50 年以上経過する施設の割合については、建設年度不明の施設数を除いて算出している

1.3 労働人口の減少が社会インフラに与える影響

我が国の人口推移は、図 1-3 に示すとおり、2010 年まで長期間、右肩上がりの上昇傾向を示したが、2010 年の 12,806 万人をピークに減少傾向に転じている。また、人口構成にも大きな変化が見られ、労働者人口の対象である 15 歳から 65 歳の占める割合が 2010 年以降、年々減少しており、2019 年には全体の 60%を下回る水準まで達している。

超高齢者社会の到来といわれて久しいが、既に高齢化率は約 30%に達しており、2060 年には 40%に到達すると予想されている。このように労働者人口の減少は、日本の労働者全体の約 3 割を占めると言われる建設従事者の供給環境にも大きな影響を与えている。短期間に高い品質の社会インフラを構築し、更には嫣然に維持し続けるための労働者の確保は困難となりつつあり、その傾向は益々深刻化している⁹⁾¹⁰⁾。

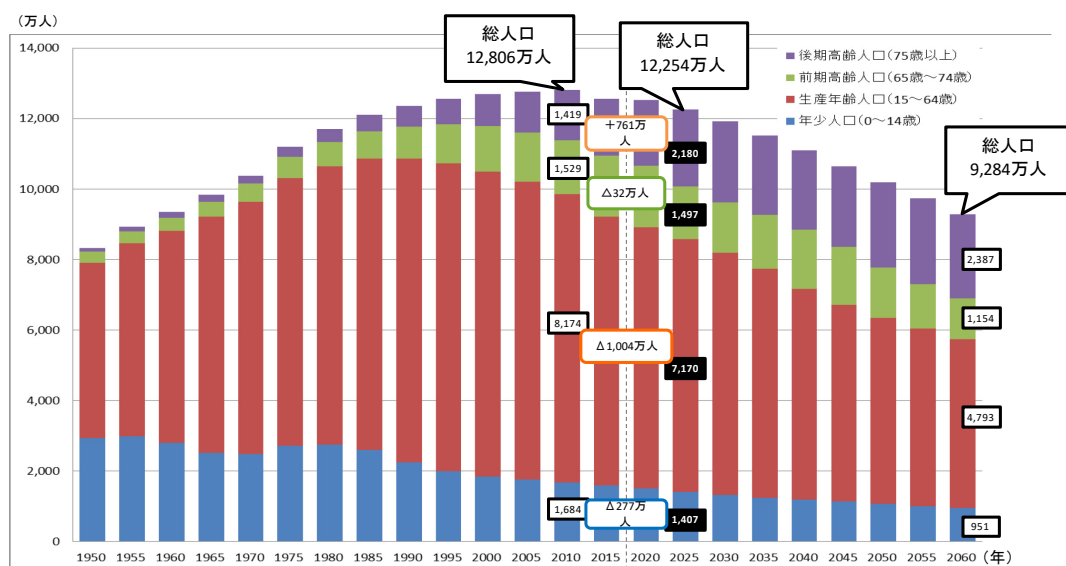


図 1-3 国内人口の推移と年齢層別の割合^{9),10)}

人口減少が構造物の維持管理に与える具体的な影響として、橋梁を対象とした人口推移と維持管理の今後について、久田らは表 1-2 に示す分析を行っている¹¹⁾。この結果は、各自治体が管理すべき橋梁を何人で維持しなければならないか分析した結果であり、全国平均では 192 人で一つの橋を維持していく必要があることを示している。

特筆すべきことは、全国の自治体でも余裕のある自治体と余裕のない自治体に大きな差が生じていることである。例えば東京都は 3,300 人／橋と全国平均を

大きく上回る結果であるが、人口 50 万人を超える政令指定都市でも、東京都に比べ岡山市においては、多数の橋梁を管理していることから、75 人／橋と東京都と比べ極端に少ない。この結果は、自治体の人口全体であるが、労働者人口が 6 割程度だと想定すると、岡山市は 45 人の税収と労働力で一つの橋を維持しなければならないともいえる。更に 1 割の労働者人口が減少する将来を想定すると 37 人程度まで減少する可能性が予想される。

人口減少率は地域差もあるため、減少率の高い自治体においては、橋梁の老朽化が進むだけでなく、支える人口が想定以上に減少し橋梁を維持するために必要な労働力や税収の確保が困難になる可能性が想定される。

表 1-2 地方別の橋梁数に対する人口割合 ¹⁾

地方	人口	橋梁数			1橋人口		
		県直轄	市町村	県内総数	県直轄	市町村	県内総数
北海道	5,381,733	5,621	18,989	24,610	957	283	219
東北	8,982,807	15,640	51,237	66,877	574	175	134
関東	42,995,031	16,168	66,583	82,751	2,659	646	520
北陸	5,311,340	11,910	37,894	49,804	446	140	107
中部	16,149,070	18,306	86,182	104,488	882	187	155
近畿	22,541,298	20,766	78,556	99,322	1,085	287	227
中国	7,235,359	16,458	70,594	87,052	440	102	83
四国	3,845,534	9,037	34,473	43,510	426	112	88
九州	14,449,895	20,502	78,816	99,318	2,858	183	145
全国・計	127,094,745	134,408	526,454	660,862	946	241	192

1.4 本研究の目的

前項に示したとおり、社会インフラの老朽化の進展と労働者人口の減少は、大きな社会問題である。一方、一連の建設工事のプロセスと維持管理においては、現状、人の力に依存する領域が多いことから、早期に生産性を向上させるために、省力化・効率化を行える技術開発とともに社会実装の実現が求められている。

2000 年以降のコンピュータ技術や半導体技術の発展は目覚ましく、日常的なコミュニケーションを行う情報媒体も固定電話やファクシミリから、携帯電話、電子メール、SNS と日々進歩しており、多くの情報技術が実用化されている。実用化された情報技術の活用は、建設分野においても各種検討されているが、コンクリート構造物に関わる実用レベルの事例は多いとは言えない。

これらの社会背景を鑑み、本研究においては、コンクリートの施工管理や維持

管理に活用できるセンサ技術に着目して検討を行った。センサを活用したコンクリート構造物のモニタリングは、過去、橋梁を中心に振動や変位を常時計測する取組みが多様な手法で実施されてきた。それらの多くは大規模かつ高コストな手法が多く、日常的な維持管理に活用可能な汎用的な手法を提案している事例は少ない。また、定期的に維持管理に活用できる非破壊検査手法も様々な手法が実用化されているが、コンクリート表面から得られる情報をもとに間接的に内部状態を予測する手法がほとんどであることから、内部の状態を定量的に捉えられる非破壊検査方法は極めて少ないのが現状である。

これらの課題に対して、本研究では、センサ技術を適用して簡便にコンクリート内部の状態を定量的に把握でき、且つ長期的に適用可能な診断技術の構築と実用化を検討した。本研究においては、計測デバイスとしてセンサ技術を適用するとともに、長期的なモニタリングに適用するために、近接無線技術である RFID (Radio Frequency Identification) の適用性を検討し診断システムとしての実用性も評価した検討を行った。

センサデバイスは、コンクリート構造物の各種計測に汎用的に用いられるひずみゲージ方式のセンサとともに、独自に開発した構造物内部の鋼材腐食に関する情報が得られるセンサ (腐食環境センサ) の適用を検討した。独自に開発した腐食環境センサに関しては、センサデザイン (形状、構成、外装) をそれぞれ検討するとともに、鉄筋腐食を捉える性能としてコンクリート模擬溶液中内における塩化物イオン濃度とセンサの検知性能の相関性を定量的に捉え検証した。

通常、コンクリート構造物の計測を各センサで行う場合、データロガーを用いて有線で接続して行うシステムが一般的であるが、ケーブル接続の煩雑さや、ケーブル自体の劣化、構造物のケーブル取り出し口から侵入する各種の劣化因子等が懸念され、長期間のモニタリングを目的として実用的なシステムとしては多くの課題がある。最近では、ケーブルに起因する課題を出来る限り解決するために、携帯通信デバイスや IoT 専用無線等を活用した無線通信システムも実用化されており、各種構造物の計測に適用する事例も見られるが、バッテリーを電源として動作させるシステムが大半であることから、定期的にバッテリー交換が求められ長期の供用には耐えられない。

そこで、実際の構造物に各センサを設置して長期的なモニタリングへの供用することを念頭に、電源レス、ケーブルレスで動作する近接無線デバイスである「センサインターフェース付きパッシブ型 RFID」と各センサを接続してシステム構築を検討した。センサインターフェース付きパッシブ型 RFID を用いたシステム構築は、海外を中心に回路設計や基本的な通信性能を中心に研究レベルの報告 例えば 12), 13), 14) 見られるが各種センサと接続した具体的なシステムとしてコンクリート構造物のモニタリングに長期間適用した事例は見られない。

センサインターフェースを有する RFID は、センサが直接接続できるという大きなメリットがあるものの、パッシブ型 RFID で得られる電力は極めて省電力であり、センサの駆動電源や実用的な無線通信距離を確保することが難しい。また、RFID の LSI を含めた電気回路部品の温度特性や A/D (アナログ-デジタル) 変換精度を考慮して設計しなければ、実用的な計測精度を確保することが困難である。

本論文においては、これらの課題解決のため、センサの改良や計測精度を確保するために、RFID を搭載した通信インターフェースの温度特性を把握したうえで、計測値のばらつきを一定内に抑制するセンサ出力値の補正式を検討した。

各センサとセンサインターフェース付き RFID で構築した診断システムについては、診断性能を確認するために、既往の手法である有線型のセンサシステムとの比較検証を行い、測定精度の検証を実施した。また、実際にコンクリート試験体内部に検討した診断システムを設置し、各種の物性試験、促進試験において耐久性を含む実用性を評価した。加えて、複数の実構造物に診断システムを実際に設置し、実環境における長期耐久性とともに適用効果を確認し、モニタリングシステムとして総合的な性能確認を行った。

また、汎用的な RFID の活用方法として、コンクリート施工時に設置するモルタルスペーサに RFID を内蔵したデバイスを設置することで、コンクリート構造物のトレーサビリティ技術に安全に適用できる手法についても検討した。このデバイスでは無線の通信指向性を活用し、かぶり検査にも活用できる可能性を検討し、その性能検証を行い新たな検査手法として提案した。

RFID の通信特性については、リーダーライタが RFID と通信する際に間に存在する介在物の誘電率が変化することが、電波強度に直接的に影響することに着目し、RFID の反射電波強度の変化を捉えることで、コンクリートの打ち込みから材齢に伴い強度発現する状況を把握する手法の可能性を示唆した。

1.5 本論文の構成

本論文の構成を図 1-4 に示す。

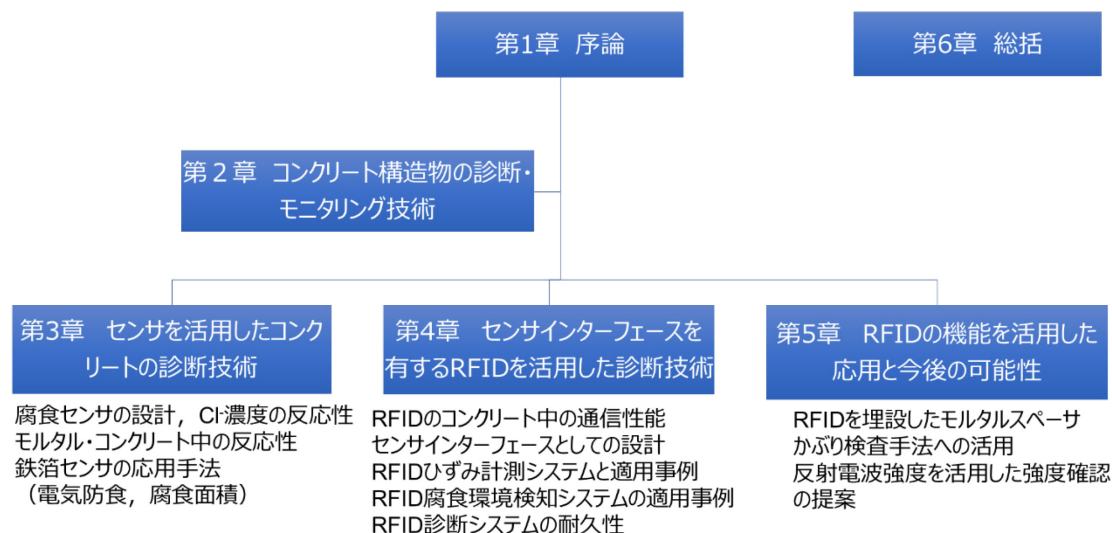


図 1-4 本論文の構成

本論文の第 1 章は、序論であり、本研究の社会的背景として我が国の社会インフラが置かれている状況や、人口減少が社会インフラの維持管理に与える影響を示し、効率的かつ省力的な維持管理技術が求められる背景を概説した。

第 2 章では、既往のコンクリート構造物の診断手法やモニタリング事例について整理し、現状のコンクリート構造物の検査技術とセンサ技術を比較し、センサ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についてはニーズが高く、海外製を中心にいくつかの技術が提案・実用化されているが、サイズや、耐久性に懸念があることや、多くの実用化されたセンサ技術の、大半は外部電源を使用した有線方式であるため、無線化と無電源化を実現することで、耐久性の高い実用的なシステムを構築できることを示した。

第 3 章においては、鉄筋腐食を検知するセンサとして「鉄箔」に着目し、検知感度の高いセンサの開発を行った。すでに実用化されている腐食センサはいくつかあるものの、その性能を定量的に示した例は少ない。鋼材の腐食現象は、電気化学的な現象として説明されているものの、センサ周囲の環境がコンクリートの場合、変化する pH の影響を受けることや、外来塩分の影響、水分や酸素の侵入等、様々な要因が複合的に作用することから、センサ適用に関しては、工学的な評価結果を示しているものが多い。

本研究で開発した鉄箔センサについても、工学的な見地に基づき、モルタル中における電気抵抗の変化を捉える検討に加え、腐食の最大要因である塩化物イオンに着目し、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、センサの検知性能を定量的に確認した。

更に鉄箔センサの応用として、流電陽極方式の電気防食工法に用いられる犠牲陽極のモニタリング方法への適用可能性を示すとともに、鉄箔センサの静電容量値変化を捉えることで、腐食面積の変化を把握し腐食の進展が確認する手法への適用可能性を示した。

第 4 章においては、鉄箔センサだけでなくひずみセンサも含め、実用的な診断システムの構築を目的として、通信インターフェースにパッシブ RFID を用いて各センサと接続したシステムの開発を検討した。パッシブ RFID は IC チップをはじめとした多数の電子部品で構成されるため、その温度特性や A/D 変換性能を踏まえて、一定の測定精度を確保できる回路設計を行った。開発したシステムについては、バッテリーも必要とせず、コンクリート内部に埋設して無線でセンサ情報が得られる診断システムとして、通信性能や計測結果を検証し実用的な性能であることを検証した。また、実際に実構造物に適用し、従来の有線センサとの性能比較を行い、特に長期の維持管理に必要な耐久性については各種の促進試験とともに、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、その適用効果を確認した。

第 5 章においては、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ぺーサを作成し、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。このデバイスにより RFID の一般的な活用事例であるトレーサビリティ技術への適用が容易にコンクリート構造物で実現することが可能となる。併せて、RFID を埋設したモルタルスぺーサの通信指向性を利用した。新たなかぶり検査手法を構築・提案した。さらに、将来的な RFID の活用可能性として、コンクリートが材齢に伴い水分が減少することに着目し、埋設した RFID の電波強度が材齢によって変化（上昇）する挙動とコンクリートの発現強度との相関を確認し、コンクリートの強度発現状況を推察する手法の可能性を示した。

第 6 章では総括として、コンクリート構造物の施工管理から維持管理までの一連のコンクリート工のプロセスにおいて RFID の多種多様な適用性が期待できる点を総括した。特に、コンクリート構造物が供用される長期のライフサイクルに耐えうる耐久性が期待できることと、適切なシステム構築により実用性が高い点、RFID 技術がコンクリート適用した際の、将来の展望と可能性を総括した。

第 1 章の参考文献

- 1) 国土交通省. 平成 27 年度建設投資見通し. 参考資料(昭和 35 年度からの建設投資の推移:付表 1).
- 2) 内閣府. 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP). 研究開発課題. p.7「インフラ維持管理・更新マネジメント技術」
- 3) 国土交通省 i-Construction 委員会. 報告書～建設現場の生産性革命～. 2016 年 4 月 11 日
- 4) 国土交通省, 予防保全型のインフラ老朽化対策の推進
- 5) 国土交通省トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会. トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会報告書. 48p,2013 年 6 月 18 日.
- 6) P. チョート, S. ウォルター, 荒廃するアメリカ, 米国州計画機関評議会編, 古賀一成訳, 開発問題研究所, 建設行政出版センター, 1987.2
- 7) 西川了一, イタリア「モランディ橋」の崩落事故の概要と示唆, 高速道路と自動車, Vol.62, No.9, Page.61-66 (2019.09.01)
- 8) 国土交通省社会資本メンテナンス戦略小委員会.第 5 回社会資本メンテナンス戦略小委員会配布資料,参考 1:社会資本に関する実態の把握結果.2013 年 2 月
- 9) 2015 年までは総務省「国勢調査」(年齢不詳人口を除く),
- 10) 2020 年以降は国立社会保障・人口問題研究所「日本の将来推計人口(平成 24 年 1 月推計)」「(出生中位・死亡中位推計)」
- 11) 久田真, 小早川正樹, 石川弘子, 鎌田貢, 公表情報に基づく自治体管理橋梁の地域格差に関する一考察
- 12) Yusuke Ikemoto, Shingo Suzuki, Hiroyuki Okamoto, Hiroki Murakami, Hajime Asama, Soichiro Morishita, Taketoshi Mishima, Xin Lin, Hideo Itoh, Force Sensor system for structural monitoring using Passive RFID tags, Sensor Review, Vol.29, No.2, pp127-136, 2009
- 13) S.G.N.Murthy, Batteries Wireless RFID Based Embedded Sensors for long Term Monitoring of Reinforced Concrete Structures, International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Berlin Germany, 2015
- 14) Nicholas Materer, Allen Apblett, Tyler Ley, Passive, Wireless Corrosion Sensors for Transportation Infrastructure, Oklahoma Transportation Center Technical Report, No.OTCREOS7.1-34-F, 2011

第2章 コンクリート構造物の診断・モニタリング技術

2.1 コンクリート構造物の診断方法

コンクリート構造物の診断方法としては，供試体を採取して各種の物性を検査する手法と，構造物を直接診断する手法に大別される。本章では，供試体による検査・試験方法は除外して構造物を直接診断する手法を中心に述べる。

構造物の検査方法の基本としては，道路橋定期点検基本要領¹⁾に示されている，近接目視検査や打音検査が基本とされ，重要構造物に対しては5年に1度の実施が義務付けられている。また，土木学会のコンクリート標準示方書 維持管理編²⁾においても，目視検査やテストハンマによる打音検査が基本と示されている。

土木学会コンクリート標準示方書 維持管理編においては，診断は「初期の診断」「定期の診断」「臨時の診断」があり，初期の診断は構造物の初期状態の把握や維持管理フェーズに入る初期の状態を示している。臨時の診断については，例えば，地震等の災害により想定を超える外力が作用したと予想される場合に実施する診断である。通常は定期診断により構造物の健全性を保つこととなる。

診断は，図 2-1 に示すとおり，点検から対策の要否判断までの工程を指し，その中で適用する点検技術や予測技術，評価技術が必要とされる。

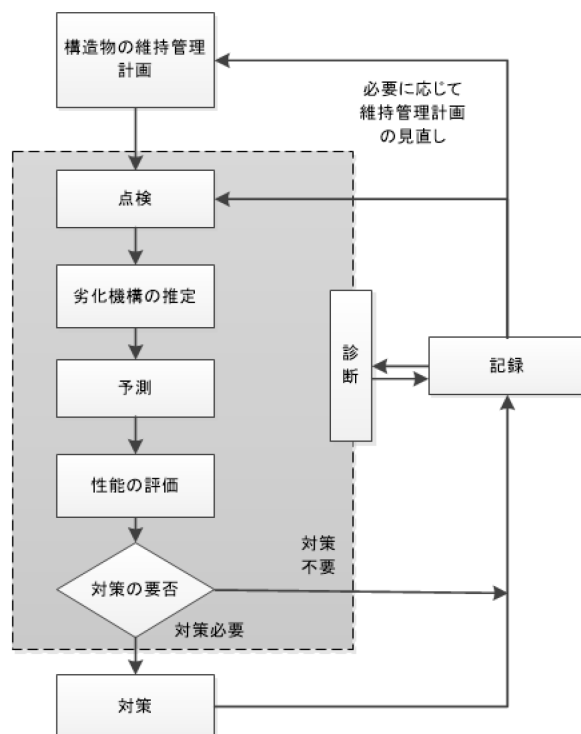


図 2-1 構造物の診断フロー²⁾

前記したとおり、コンクリート標準示方書によれば初期点検や日常点検では目視を基本として必要に応じて、たたき等の調査を行うとされている。目視検査においては、遠望目視を巡回で実施し点検が可能な箇所のみが対象とされているため、明らかに表面化した劣化や変状が生じていないと、日常点検で劣化や変状は発見することは困難である。

定期点検においては、目視点検とたたきが基本ではあるが、日常点検では不可能な箇所においても足場等を設置し、点検することとしている。また、目視点検においても、ひび割れやエフロレッセンス、さび汁、変色、スケーリング等、着目すべき現象が挙げられており、非破壊検査や一部の試料採取による分析については、点検者が構造物の状態に合わせて必要に応じて実施することが推奨されている。

このように定期点検においては、点検周期や対象構造物の重要度、構造物の状態によって、点検手法を選択することとなるが、表面化した劣化現象を捉えることが基本的な手法となるため、「事後保全的維持管理」となることや、鉄筋コンクリートの内部鋼材の腐食をはじめとする内部の状態把握が困難なため、内部状態を効率的かつ省力的に把握することができ、且つ「予防保全的維持管理」に適用できる点検方法・点検技術が強く望まれている。

2.2 代表的な破壊検査

構造物を直接診断する手法には、破壊（微破壊も含む）検査手法と非破壊検査があり、破壊検査は多くの実例がある直接コアを採取して調査する手法である。

直接コアを採取する場合は、JIS A 1107「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」に規格された手法で採取することとなり、圧縮強度を確認することとなる。加えて採取したコアから JIS A 1152:2018「コンクリートの中性化深さの測定方法」による炭酸化度合いや JIS A 1154:2020「硬化コンクリート中に含まれ 塩化物イオンの試験方法」による塩化物イオンの浸透度合いを把握し、耐久性に影響する劣化因子の分析を実施することもできる。

直接コアを採取する場合は、健全であっても構造物自身を破壊しなければならないという大きな懸念点が生じることや、コア抜きを行う際に誤って内部鉄筋を破断してしまうリスクが生じることから、一般的な $\phi 100$ mm のコアより小さい $\phi 50$ mm 以下の小径コア^{3),4),5),6)}を使ったソフトコアリング法により、出来る限り破壊サイズを小さくすることが提案されている。また、ドリルで削孔して構造物から採取した粉末を用いて各種分析を実施する手法も提案されており、「ドリル削孔粉を用いたコンクリート構造物の中性化深さ試験方法、NDIS 3419」として規格化され実用化されている。この手法では、削孔粉を分析試料として耐久性に関わる中性化度合いを把握することとなる。

2.3 コンクリート構造物の非破壊検査技術

コンクリート構造物の非破壊検査技術は、JIS Z 2300 で「非破壊試験」として、素材又は製品を破壊せずに、品質又はきず、埋設物などの有無及びその存在位置、大きさ、形状、分布状態などを調べる試験。と定義されており、JIS Z 2300 の「非破壊検査」は、非破壊試験の結果から、規格などによる基準に従って合否を判定すると定義されている。

コンクリートを対象とした非破壊検査技術は、多くの研究開発事例や実用事例が存在しており、体系化された報告も多数存在する^{7),8),9)}。各種の報告の中では、非破壊試験に前述した破壊試験の一部を含んでいるケースも見られる。

非破壊試験は、表面から得られる情報を活用するため、極表面に近い位置の状態は比較的正確に把握できるものの、数 cm 以上深い内部の状態を正確に把握することは難しいと言われている。例えば、表面で発見されるひび割れの深さについては、超音波法や衝撃弾性波法で比較的正確に捉えられるものの、表面から確認できない浮きや剥離は、その深さ位置によっては、非破壊検査手法では判別できないケースもある。また、非破壊検査の代表的な手法であるテストハンマによる打音法については、検査する人間の経験や感覚も左右してしまう。

比較的、深い位置の情報が得られる手法として広く普及している電磁波レーダー法では、かぶりコンクリートを可視化することができ、内部空洞や鉄筋位置を比較的正確に捉えることが可能である。

これら、非破壊検査試験の全体的な課題としていえることとして、測定精度や結果の信頼性はもちろんであるが、手法によっては原理が難解であり利用者の理解が進まないことや、装置の操作手法が複雑であることも挙げられる。加えて検査装置の価格が挙げられる。先に挙げた電磁波レーダーによる検査装置は数百万円程度の装置であり、他の非破壊検査装置も高価な装置が比較的多い。また、測定精度や結果の信頼性については、利用者の多くが破壊検査や供試体による試験結果と同等の測定精度を求める点も普及の課題といえる。計測結果を解釈するうえで、非破壊検査があくまでも間接的な情報を評価していることを適切に理解したうえで、測定精度の許容範囲を捉えることが肝要と考える。

非破壊検査手法が広く普及するためには、原理の理解が進むとともに簡便な操作方法で得られるデータの解析が容易であることが望まれ、加えて検査装置の低価格化が進むことが必要である。

表 2-2 にコンクリート構造物を対象とした実用的な非破壊検査手法の適用範囲を示す。コンクリート表面に近い部分の状態を知る方法がいくつかあるものの、コンクリート内部の状態を知る方法は少なく、特に鉄筋腐食や PC ケーブルの腐食は非破壊検査技術では把握することが困難である。また、破壊検査も同様であるが、多くの非破壊検査もコンクリート表面からアプローチすることから、

露出した部分のみが計測対象となる。露出していたとしても塗装している場合は、手法によっては検査ができないケースもある。また、橋梁の支承周囲や水が溜まりやすい狭小部等、構造物の形状によっては、アプローチできない箇所の劣化が進むケースも考えられる。予防保全的な維持管理を実現するためには、劣化の兆候を出来る限り早期に発見する必要があることから、後述するセンサ技術を適用し、内部や計測できない箇所をモニタリングし、破壊検査や非破壊検査と組合せて総合的に診断することが必要と考えられる。

表 2-1 代表的な非破壊検査方法とその適用性

非破壊 検査技術	← コンクリート表面 コンクリート内部 →					
	コンクリート表面の欠損	亀裂深さ	鉄筋配置	鉄筋腐食状況	グラウト充填状況	ケーブル腐食状況
赤外線法	○	—	—	×	×	×
超音波法	○	○	—	×	×	×
電磁波法	○	—	○	×	×	×
インパルスエコー法	○	○	—	×	○	×
X線透過法	○	○	○	×	○	×
衝撃弾性波法	—	—	—	×	○	×
自然電位法	—	—	—	△	×	×

2.4 各種センサによるコンクリートの計測

破壊検査や非破壊検査のようにコンクリートから直接もしくは間接的に情報を取得する手法と他に、検査対象の構造物に何らかの媒体を接触させることや埋設することで、その媒体の変化を確認してコンクリートの情報を取得する手法があり、その媒体がセンサといえる。図 2-1 に破壊検査、非破壊検査、センサによる計測の違いを示した。

コンクリートをセンサで計測する手法には様々な手法が使用されている。適用されるセンサも熱電対からひずみゲージのように、非破壊検査より古くから適用されている種類から、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技術を適用した新しいセンサまで多種多様である。

熱電対はコンクリートの硬化時の発熱を計測することで、温度応力の分布や積算温度からの強度推定や、凍害リスク等、その目的によって設置位置や本数を考慮して計測される。

ひずみゲージにおいては、ゲージ式変位計も含めれば、コンクリート施工時の

自己収縮や膨張材の挙動、その後の乾燥収縮のように材料評価に適用されている。材料評価面ではアルカリ骨材反応による膨張や遅れエトリングait膨張を把握するためにもひずみゲージは適用される。構造性能を把握する場合にも表面にひずみゲージを貼付することや、変位計で物理的変状を計測するケースは多い。ひび割れの発生前からひずみは発生し、ひび割れが進展することで、ひずみも伸長することから π 型ゲージ等も使われている。このように、ひずみ計測は施工から維持管理まで広く適用されており、センサとしてのひずみゲージのニーズは高い。表 2-2 に代表的なセンサとその適用目的の一例を示す。

コンクリートに限らず構造体としてのセンサ活用まで見渡すと、加速度センサを活用した振動計測^{10),11)}や、光ファイバセンサを用いた変形計測^{12),13)}やプレストレス応力の管理¹⁴⁾もセンサ活用の事例といえる。前者の加速度センサは振動変化を把握することで外力変化や構造物の固有振動数の変化を捉えることで健全性を把握することに用いられるケースが多い。

後者の光ファイバセンサについては、加速度センサと同様に振動状態を計測することで固有振動数を計測することも可能であるが、傾斜や構造物全体の伸縮挙動を計測している事例もある。また、光ファイバセンサは環境温度の変化をセンサ自身の熱膨張変化から捉えることも可能なため、変位やひずみと同時に温度も計測できる利点がある。加えて、多くのセンサは電気信号の入出力により計測していることから、防水性や雷からの保護と電線の腐食を考慮しなければならないが、電気信号を用いない光ファイバセンサはそれらの懸念が生じない。

また、センサを使った計測の中では、複数種類のセンサを多量に構造物に設置して長期間モニタリングを行うといった構造物ヘルスマニタリング (Structural Health Monitoring (SHM)) という試みでは海外の長大橋を中心に適用¹⁵⁾されてきており、個々のセンサによる計測のみならず、構造物の維持管理を人間の点検ではなく、センサにより監視することの効率性を確保している事例が多い。

センサ技術に関しては、個々のセンサの機能や信頼性に注目されがちであるが、実際にはセンサの原理を実用面においては、センサを接続する計測機やセンサ出力を表示する機器も重要である。例えば、センサは非常に小さく、構造物に影響を与えないとしても計測器が大型なため、実構造物に設置することが困難というケースもあり、センサ単体のみで実用的か否かは判断できない場合もある。

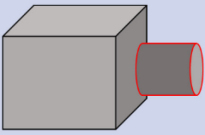
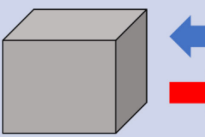
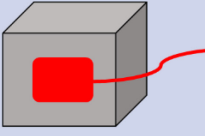
種類	イメージ	検査方法	メリットとデメリット
破壊検査		構造物自身から試料を採取して評価	メリット：構造物の正確な情報が得られる
			デメリット：健全であっても一部を破壊する
非破壊検査		構造物に何らかの信号を与える	メリット：構造物を破壊しない
		構造物から得られる情報から評価	デメリット：表面近傍の状態しか正確に検査できない。
センサ計測		構造物の変化を捉える媒体から得られる情報を評価	メリット：構造物を破壊しない、（内部も含め）任意の場所を計測できる
			デメリット：センサ情報が構造物の状態と同一であることを証明する必要がある

図 2-1 各種検査手法の違い

表 2-2 各センサと計測目的の一例

センサ種類	適用分類	適用目的
熱電対	材料評価	温度応力の分布 積算温度からの強度推定、凍害リスク等
ひずみゲージ	材料評価 構造評価	自己収縮や膨張材の挙動、乾燥収縮等の材料評価 アルカリ骨材反応の残存膨張 ひび割れ進展、熱膨張ひずみ、クリープ等
加速度センサ	構造評価	振動、固有振動数、傾斜 外ケーブルや斜材の張力（振動法による推定）
光ファイバ	構造評価 材料評価	傾斜や構造物全体の伸縮、プレストレス応力 熱膨張ひずみ、温度

2.5 鉄筋腐食を対象としたセンサ技術

表 2-1 で示すとおり、現状の非破壊検査技術においては、鉄筋や PC ケーブルの腐食状況を知る手段は少ない。鉄筋腐食では自然電位法が ASTM 等で規格化もされており、非破壊検査技術として扱われることもあるが、それらの手法は鉄筋にケーブルを接続しなければいけないため、実際には構造物に傷を与えるケースが多い。鉄筋腐食に関するセンサ活用はまだまだ限定的といえるが、各種のセンサは研究レベルから実用レベルまで、多数のセンサが国内外で提案されて

いる。

2.5.1 既往の鉄筋腐食センサ

海外では 1980 年代後半から腐食を対象としたセンサが研究されており、一部は日本国内でも適用された実績を有する。国内においても「実用化レベル」にあるものは、2019 年に国土交通省 東北地方整備局が実施した「道路橋の塩害モニタリング技術」¹⁶⁾で適用されたものが代表されるが、研究レベルではいくつかの手法が提案されている。

(1) エクспанジョン・リングシステム ^{17),18)}

図 2-2 に示すセンサは主には既設構造部を対象としたセンサである。既設構造物にコア抜きを施したのちに、その孔に施工する仕組みであるが、場合によっては新設構造物に埋設する事例も見られる。センサの構造的には、検知部はコンクリート表面から 6 段階に配置されている。図 2-3 に示す計測原理のとおり、検知部である板状のリングを鉄筋と見立てて、別途取付けるカソード電極部との電位勾配の計測を行う。表面からかぶり深さ方向に複数の検知部が配置されていることから、時間経過とともに表面より徐々に腐食因子が侵入して進展することを検知できるとしている。

(2) アノード・ラダー・システム ^{19),20)}

このセンサはエクспанジョン・リングシステムの検知部が板状のリングであることに對し図 2-4 のとおり、ほぼ鉄筋と同形状であることを特徴としている。図 2-5 に示すとおり、みがき棒鋼が階段状に 6 段階配置されており、それぞれの鋼材の電位勾配や腐食電流をエクспанジョンリングシステムと同様に別途設置するカソード電極間で測定する手法である。このシステムは 1990 年以来、世界各国の 600 以上の構造物に適用しているとの報告が見られる。



図 2-2 エクспанジョン・リングシステムと計測状況

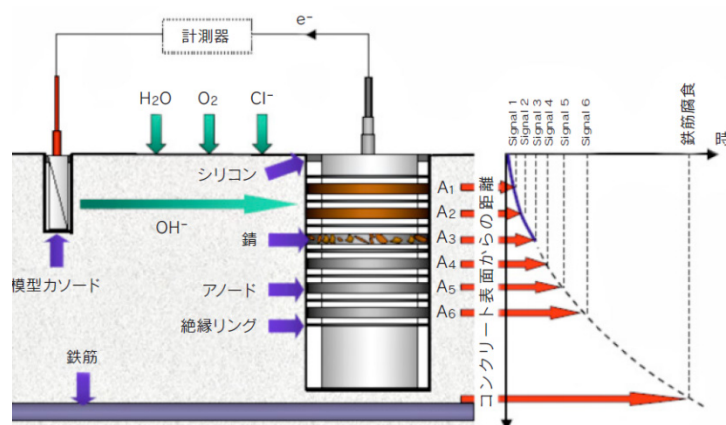


図 2-3 エクспанジョン・リングシステムの計測原理



図 2-4 アノード・ラダー・システムと設置状況

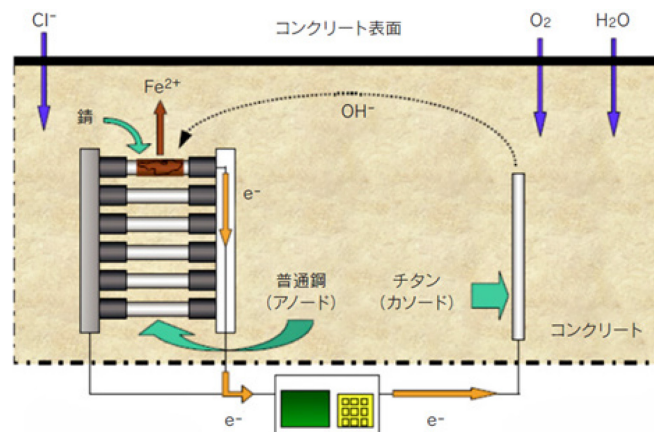


図 2-5 アノード・ラダー・システムの計測原理

(3) CorroWatch ²¹⁾

図 2-6 に示す CorroWatch は、アノード・ラダー・システムと同様にほぼ鉄筋を模擬した検知部を備え。放射状に配置された検知部の高さ位置を変化させていることで、図に示すとおり、かぶり部に設置し、腐食可能性を表面から 4 段階を段階的に捉えることとしている。検知部を固定している台座部分がカソード電極として左右することから、設置の手間が少ない。

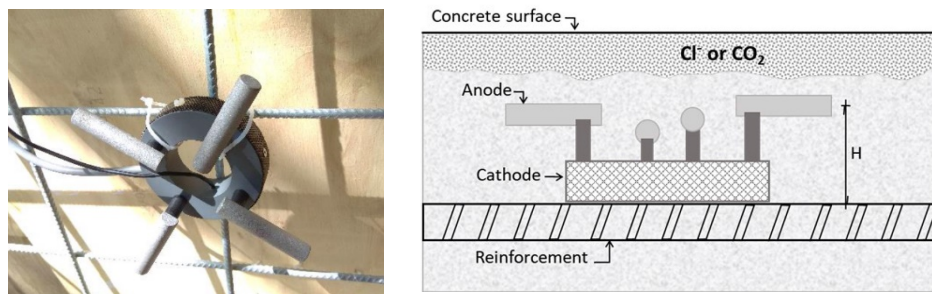


図 2-6 CorroWatch の外観と設置方法 ²¹⁾

(4) ECI-2 ²²⁾

図 2-7 に示す ECI-2 はセンサ単体というより、5 種類のセンサを組合せたモジュールである。模擬鉄筋である Working Electrode のとステンレス鋼の Reference Electrode 間の電位勾配に加え、分極抵抗、コンクリート抵抗や塩化物イオン量、コンクリート温度も計測可能である。モジュールに搭載した銀／塩化銀電極で塩化物イオン量を、ステンレス電極でコンクリート抵抗を計測できる。また、ECI-2 には複数のモジュールを接続してネットワーク可できるハブが用意されている。ハブにはロガー機能やバッテリー、携帯通信モジュールを搭載し、連続的なモニタリングや遠隔モニタリングを行うシステムも提供されており、構造

物全体の腐食可能性を視覚的にマッピングできるとしている。

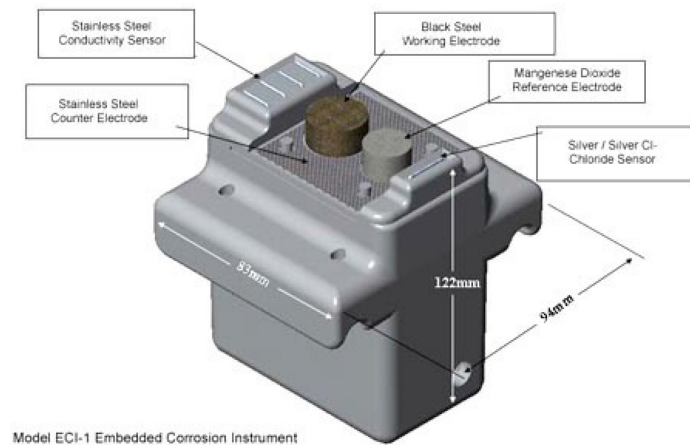


図 2-7 ECI-2 の外観と機能 ²²⁾

(5) 腐食センサ CS5 ^{23),24)}

図 2-8 に示すセンサは、鉄筋を模擬した直径が 0.1mm の細い鉄線を円柱状のモルタル製支持体に巻き付け、かぶりに応じて鉄線がコンクリート表面から、5, 25, 50 および 75mm の深さに位置するようにコンクリート中に埋設して使用する。腐食因子が鉄線に到達して腐食が進むと鉄線は破断し、破断した位置で腐食が進んだことを検知することができるとしている。切断の有無は、各鉄線両端の電位差を測定することにより判定する手法であるため、完全に破断に至らないと判定ができない。

(6) 光ファイバセンサを用いた鋼材の腐食検知 ^{25),26)}

この技術は光ファイバセンサの新たな使用方法として、非常に興味深い技術である。図 2-9 に示すとおりみがき棒鋼の軸高さ方向の中央区間に、FBG 光ファイバをらせん状に巻き付け、ファイバの両端を棒鋼に接着固定しているもので、みがき棒鋼が腐食により体積膨張する状況を光ファイバでひずみとして計測する技術である。このセンサでは、鋼材の体積膨張を捉えることから、腐食初期の検知は困難であるが、腐食が進展しひび割れを発生する手前の膨張ひずみを捉えられるとしている。

光ファイバはセンサが極めて細いため、露出したファイバとコンクリートの界面から劣化因子が侵入しにくいことや、電磁的ノイズをうけず、耐久性も高い等の利点がある。

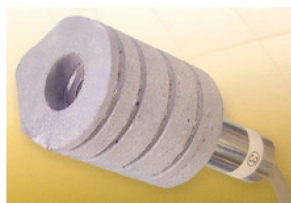


図 2-8 腐食センサ CS5（日本防蝕工業株式会社カタログより）

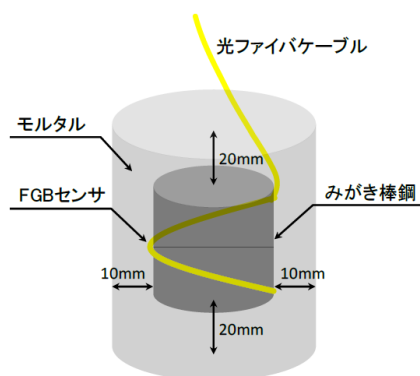


図 2-9 光ファイバセンサを用いた鋼材の腐食検知方法

2.5.2 鉄筋腐食センサの課題

鉄筋腐食を対象としたセンサ技術は様々なものがあることから、表 2 に整理した。表 2-3 に示すとおり計測手法は、従来手法と同様に電位計測、電流密度（分極抵抗）を計測する手法と、鉄線や鉄箔の破断や欠損による電気特性の変化を捉えるセンサに大別される。計測器に関しては多くが専用計測器によるものであるが、電位であれば、内部抵抗が 1Mohm を超えるテストで計測可能である。

海外製のセンサは総じてサイズが大きく、国内製は比較的サイズが小さい。また、海外製のセンサは実際の鉄筋に近い検知部を有しているものが多く、中にはミルスケール付きのものもある。センサ全体としての課題を以下に示す。

（１）センササイズと設置方法

図 2-10 に各センサを設置の際にかぶりに影響する高さ、設置体積の関係を示した。海外製のセンサはどれも大きく、実際の構造物のかぶりに設置することを想定すると、構造物への影響は避けられず、センサの設置自体が劣化を招く要因になるのではないかと懸念される。更には検知部である鉄部材も鉄筋と近しいサイズであることからセンサの腐食による、ひび割れ、かぶり部の剥落

につながるリスクが懸念される。日本製のセンサはかぶりに設置する影響も考慮しており、比較的、小さいサイズのものが多く、センサの検知部が腐食したとしても、構造物へ与える影響はほぼないものと考えられる。

なお、鉄筋腐食を対象とする場合は、新設時のみならず、補修後の再劣化の有無を検査する際にも使用できることが望ましい。そのため、新設時のみならず補修時の設置方法も簡便な手法を提供できることがよい。

(2) センサ筐体素材における課題

各センサの筐体は様々な素材が使われている。モルタルや鉄であれば設置対象のコンクリートとほぼ同じ熱膨張率であるが、樹脂になると設置対象のコンクリートと熱膨張差が生じる。気温変化に伴い、熱膨張率の差がひび割れを誘発することがないように確認が必要である。また、筐体の素材の強度が設置対象のコンクリートより低い場合は、構造耐力の弱点となりえることから、設置対象より高い強度の素材が望ましい。

表2-3 各腐食センサの概要比較

センサ種類	国	計測値	原理	計測器	検知部	筐体	ケーブル
腐食センサCS5	日本	線間電位	鉄線の破断	テスト、データロガー	鉄線	モルタル	有線
光ファイバセンサの腐食検知	日本	ひずみ	鋼材の膨張ひずみ	専用計測器	FBG 光ファイバ	モルタル	光ファイバ
エクспанジョン・リングシステム	独逸	電位	カソードとの電位差	専用計測器	鉄板リング	SUS	有線
アノード・ラダーシステム	独逸	電位	カソードとの電位差	専用計測器	鉄筋	なし	有線
Corro Watch	独逸	電位	カソードとの電位差	テスト、データロガー	鉄筋（黒皮）	なし	有線
ECI-2	米国	電位、他	カソードとの電位差	専用計測器	鉄筋（黒皮）	樹脂	有線

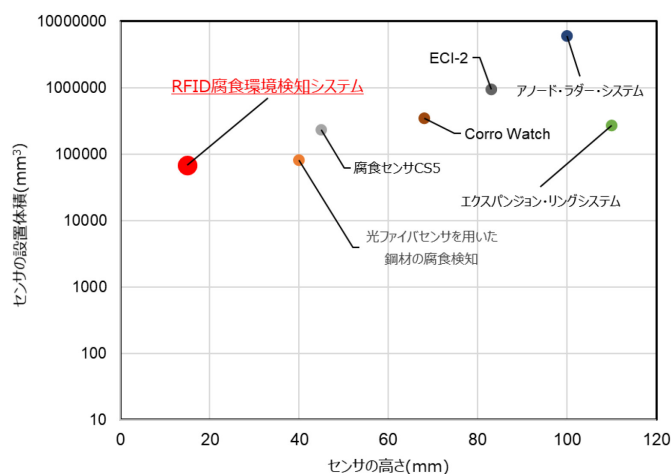


図 2-10 各センサのサイズと設置体積

(3) センサシステムの耐久性

鉄筋腐食の現象は、通常的环境において普通にコンクリートを施工すれば新設から数年で生じることには少ない。概ね 20 年以上から数十年を経て顕在化する劣化現象である。すなわち、新設時にセンサを設置する場合、センサも数十年レベルの耐久性が求められる。補修時にセンサを使う場合においても、補修を必要とする環境であることを踏まえると、通常的环境より厳しい環境であることが想定されることから、高い耐久性が必要である。

センサを使ったモニタリング事例の中には、しばしば、構造物の健全性をモニタリングしているのか、センサや計測システムが適切に動作していることをモニタリングしているのか、わからない事例が見られる。構造物の近接目視検査より頻繁にセンサの動作確認が必要になると本末転倒である。既往の研究内容においては、センサの検知性能や適用事例の報告は多いものの、長期間の耐久性や適用性を確認した報告は限られており、今後は、センサの長期供用性に関する研究報告が期待される。また、センサそのものの耐久性はもちろんのこと、センサに付随するケーブルやコネクタの耐久性も重要である。特に計測器とケーブルを介して接続するセンサについては、構造物からケーブルを露出させるか、コネクタ部を表面に設置しておかなければならず、埋設するセンサより、厳しい環境に晒される。そのため、紫外線による劣化や、防水性、防塵性に加え獣害を避ける等、十分に供用環境を考慮する必要がある。

(4) センサ用電源の確保

センサの電源をどのように確保するのかについては、鉄筋腐食センサに限るものではなく、センサ技術全般の課題である。

本報で紹介した各種センサは連続的にモニタリングするものではなく、定期的に計測器で都度計測する技術であり、計測器もバッテリーで動作することから、電源の有無はさほど問題にはならない。一方、長期的に継続して遠隔からモニタリングする場合には、計測器の通信に必要な電源確保が課題となる。また、バッテリーで電源を確保する場合には、検査や計測に必要とされる頻度よりバッテリーを交換する頻度が高くなることのないように検討する必要がある。

(5) センサ技術に対する認知と理解

センサ技術を検査技術や点検技術に活用するためには、実際に施工する施工者はもちろんのこと、実際に維持管理を行う管理者（構造物所有者）の認知と理解を得ることが重要である。

現時点においても、センサを設置して測定した事例は多くはない。そのため、センサの測定値が正しいのかを問われることや、長期的にもセンサの値に変化が現れないことから、設置自体の意味を問う声が聞かれる。センサの値に変化がないということは構造物も変化していない、すなわち健全であると証明できる結果といえるが、何らかの劣化現象の検知をしないと、センサの効果を実感されないのが現実である。また、初めてセンサを設置する構造物は、センサから得られたデータをどのように評価すれば良いかわからない事もある。

このようなソフト面の課題を解決することは容易ではないが、本研究をはじめ、多くの実証データを示していくことが重要であり、同時にセンサを活用した「予防保全型維持管理」の標準化や規格化が必要と考える。

(6) センサ活用におけるシナリオ

センサの課題は、性能や適用面だけでなく、長期的に活用するための運用面の課題も少なくない。

鉄筋腐食センサは検知部（鉄）が腐食することを電気特性の変化から把握するものがほとんどである。そのため、破壊検査による塩化物イオン濃度や中性化を把握し、鉄筋腐食の可能性を類推する手法に比べ、明確に鉄筋腐食の可能性を高い精度で捉えることができる。一方でセンサが腐食を検知した場合は、何らかの原因によって鉄が腐食する環境であることを示しているが、センサの計測値からその原因を把握することはできない。そのため、破壊検査による塩化物イオン量の分析や中性化試験とは異なり、センサの計測結果は、予防保全的な注意喚起には活用できるものの、腐食原因に応じた補修対策の立案に活用することは困難である。ひび割れによる劣化の場合、対象部材の重要やひび割れ幅から、補修の可否を判定する基準²⁷⁾が存在する。

鉄筋腐食の場合においても、塩化物イオンの侵入であれば、脱塩工法や塩分吸着剤による補修、中性化であれば再アルカリ工法といったように、腐食の原

因によってその対策手法を選定する。したがって、原因を把握できないセンサで鉄筋腐食を検知した場合に、その後のアクションをどのように行うか、例えば、センサの検知後は最小限の破壊による詳細検査により対策を検討する等、予めシナリオを想定して運用することが望ましいと考える。また、センサは構造物に設置した位置の局所的な状態を把握する技術であり、構造物全体の健全性を評価するものではない。そのため、構造物の形状や環境条件を網羅してセンサを出来る限り多く設置することが望ましく、多くのセンサの計測結果を総合的に評価することが必要である。

2.6 センサ技術の実用化に向けた課題解決と期待

各種のセンサは、基本有線で計測するシステムである。前述したようにセンサを計測するためのケーブルは耐久性面の大きな課題であることから、無線による計測システムとして利用できることへの期待は大きい。現状、LPWA(Low Power Wide Area)をはじめとして Bluetooth Low Energy 等の極めて省電力で通信できる技術も進化しているがいずれもバッテリーで駆動させるため、結局はバッテリーの容量が課題となる。また、バッテリー交換を行うためには、バッテリーを埋設することはできない。最近では太陽光をはじめとする環境発電等による充電も現実的ではあるが、ソーラーセルの耐久性や各発電デバイスと無線モジュールへは有線で接続しなければならず、完全なケーブルレスは実現できない。将来技術としてワイヤレス給電技術には期待が大きく、例えば、構造物に埋設した大容量キャパシタへコンクリートを通じて無線給電することができ、その電力により省電力無線でセンサ計測を行うことが可能になり、ケーブルレスも実現できる。

鉄筋腐食は短期間で進展する劣化ではなく、長期間に亘って進行することから、連続的なモニタリングを行う必要性は低いものの、点検、診断労力の効率化の観点では、遠隔モニタリングの期待は高い。すなわち、センサの適用性向上のためには、センサ性能のみならず、周辺の通信技術、無線技術、電源供給技術の発展が重要である。

2.7 第2章のまとめ

本章では、コンクリート構造物の維持管理において現状の検査手法とセンサ技術を比較して、センサ技術の必要性を確認した。センサ技術においても鋼材腐食を対象としたセンサに注目し、現状、実用化されたセンサに関して、実用化に向けて解決すべき具体的な課題を整理して、電源確保や無線化といった技術側面だけでなく、センサを活用した維持管理における、運用シナリオの重要性といった点についても示唆した。

- (1) 実用化されたセンサの多くのサイズは大きき、実際の構造物のかぶりに設置することを想定すると、センサの設置自体が劣化を招く要因になることが懸念される。検知部も鉄筋と近いサイズが多いため、腐食を検知後にセンサの腐食による、ひび割れ、かぶり部の剥落につながるリスクが懸念されることからセンサのサイズは極めて重要である。

なお、鉄筋腐食を対象とする場合は、新設時のみならず、補修後の再劣化の有無を検査する際にも使用できることが望ましい。

- (2) 各センサの筐体はモルタルや鉄であれば設置対象のコンクリートとほぼ同じ熱膨張率であるが、樹脂になると設置対象のコンクリートと熱膨張差が生じる。気温変化に伴い、熱膨張率の差がひび割れを誘発することがないように確認が必要である。また、筐体の素材の強度が設置対象のコンクリートより高い強度の素材が望ましい。

- (3) センサには、コンクリートのライフサイクルに見合う高い耐久性が求められる。そのため、センサに付随するケーブルやコネクタの耐久性も重要であり、有線センサに関しては、ケーブル類が埋設するセンサより、厳しい環境に晒されることから、ケーブルやコネクタ類の耐紫外線、防水性、防塵性に加え、獣害を避けられる工夫等、供用環境を十分に考慮する必要がある。

- (4) センサの電源をどのように確保するのかについては、センサ技術全般の課題である。長期的に継続して遠隔からモニタリングする場合には、計測器の通信に必要な電源確保が課題となる。また、バッテリーで電源を確保する場合には、検査や計測に必要とされる頻度よりバッテリーを交換する頻度が高くなることのないように検討する必要がある。

- (5) センサを設置する構造物は、センサから得られたデータをどのように評価すれば良いかわからない事もある。センサによる多くの実証データを示し、施工者や管理者（構造物所有者）の認知と理解を得ることを重ね、センサを活用した「予防保全型維持管理」の標準化や規格化が必要と考える。

- (6) センサが腐食を検知した場合は、何らかの原因によって鉄が腐食する環境であることを示しているが、センサの計測値からその原因を把握することはできない。センサの計測結果は、予防保全的な注意喚起には活用できるものの、腐食原因に応じた補修対策の立案に活用することは困難である。原因を把握できないセンサで鉄筋腐食を検知した場合に、その後のアクションをどのように行うか、例えば、センサの検知後は最小限の破壊による詳細検査により対策を検討する等、予めシナリオを想定して運用することが望ましい。また、構造物の形状や環境条件を網羅してセンサを出来る限り多く設置することが望ましい。

- (7) 鉄筋腐食は短期間で進展する劣化ではなく、長期間に亘って進行することから、連続的なモニタリングを行う必要性は低いものの、点検、診断労力の効率化の観点では、遠隔モニタリングの期待は高い。センサの適用性向上のためには、センサ性能のみならず、周辺の通信技術、無線技術、電源供給技術の発展が重要である。

第2章の参考文献

- 1) 国土交通省，定期点検要領
- 2) 土木学会 コンクリート標準示方書
- 3) 寺田謙一，谷川恭雄，江口清，中込昭，佐原晴也，若林信太郎，小径コアによる構造体コンクリート強度の推定に関する研究(その1～5)，日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.847-856，2000.9
- 4) 日本コンクリート工学協会，品質評価試験方法研究委員会報告書,pp.167～206,1998.12
- 5) 小阪義夫，谷川恭雄，各種コンクリートの圧縮強度に及ぼす試験体寸法と載荷面の摩擦の影響について，セメント・コンクリート，pp2-11，No.265,1969
- 6) 寺田謙一，谷川恭雄，中込昭，佐原晴也，小径コアによる構造体コンクリート強度の推定法，コンクリート工学，Vol.139，No.4，2001.4
- 7) 日本コンクリート工学協会，コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告書，1992
- 8) 魚本健人，非破壊検査の現状と今後の期待，コンクリート工学，vol.44，No.5，2006.5
- 9) 土木学会建設技術研究委員会 建設技術体系化小委員会，コンクリートの非破壊検査のリニューアルWG，非破壊検査に関するアンケート調査報告，2017
- 10) 日高みなみ，佐藤大輔，大久保孝昭，無線加速度センサを用いたコンクリート部材の振動計測手法の提案，コンステック HD・テクニカルレポート，No.17，Page.81-85，2014
- 11) 李亮，大久保孝昭，松本慎也，宮本文穂，無線加速度センサを用いた振動計測システムの老朽橋梁への適用と有効性，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.2219，2014
- 12) 勝木太，堤洋一，加藤佳孝，魚本健人，非破壊検査手法を用いた既設PC桁の調査，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，Page.1813-1818，2005

- 13) WOLFF R, MIESSELER H-J, New materials for prestressing and monitoring heavy structures, Concrete International, Vol.11 No.9
- 14) MENDEZ A, MORSE T F, MENDEZ F, Applications of embedded optical fiber sensors in reinforced concrete buildings and structures, Proceedings of SPIE, Vol.1170 Page.60-69, 1990
- 15) Y.Q. NI, K.Y. WONG, Integrating Bridge Structural Health Monitoring and Condition-Based Maintenance Management, Civil Structural Health Monitoring Workshop,2012
- 16) 国土交通省,「道路橋の塩害モニタリング技術」, 令和3年3月29日
- 17) 辻伸幸, 向井浩三, 綾田隆史, 新井孝弘, 鳥海廣史, エクспанション・リングを用いた鋼材腐食モニタリング, 土木学会第59回年次学術講演会講演概要集 部門VI, Vol.59, Page.189-190, 2004
- 18) M,Raupach, P.Schiessl, Monitoring the Risk of Reinforcement Corrosion Using the Expansion-Ring-System, Proceedings of the 1st fib Congress, Vol.2, Page.171-178, 2002
- 19) M,Raupach, P.Schiessl, Monitoring System for the Corrosion Risk for Steel in Concrete, Concrete International, Vol.14, No.7, Page.52-55, 1992
- 20) 長尾進, 飯田博光, 大塚孝義, アノード・ラダー式鉄筋腐食モニタリングシステムの適用事例, 土木学会第59回年次学術講演会講演概要集 部門VI, Vol.59, Page.191-192, 2004
- 21) <https://www.germanninstruments.com/wp-content/uploads/2022/02/CorroWatch-CW-TDS-01.pdf>
- 22) <https://corrosioninstrument.com/wp-content/uploads/2014/05/ECI-2-Product-Brochure-Rev.-1.3.pdf>
- 23) 日本防蝕工業株式会社カタログ
- 24) 武若耕司, 山本 悟, コンクリート中の塩化物浸透過程非破壊モニタリングシステムの開発研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.1, Page.1183-1188, 2001.7
- 25) 早野博幸, 他, 光ファイバセンサを用いた鋼材の腐食検知に関する研究, 土木学会第70回年次学術講演会講演概要集 部門V, Vol.70, Page.412-413, 2015
- 26) 早野博幸, 井坂幸, 吉田愛, 江里口玲, 光ファイバセンシングによる鋼材の腐食膨張挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, Page.1263-1268, 2016
- 27) 日本コンクリート工学会, コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針-2003-, p.75

第3章 センサを活用したコンクリートの診断技術

3.1 鉄筋腐食を対象とした新たなセンサの検討

第2章で概説したとおり、センサ技術に関しては様々な課題があることから、本章では、課題解決に向けて新たなセンサを開発することを目的として検討を行った。なお、検討にあたっては、既往の腐食センサに関する研究や鉄筋腐食の評価方法の課題を整理したうえで、新たなセンサの設計に取り組んだ。

3.1.1 鉄線方式腐食センサの性能

鉄線方式の腐食センサは武若らの研究報告¹⁾にあるように、 $\phi 0.1\text{mm}$ の極細鉄線を円筒形のポリマーセメントモルタルに巻き付けており、鉄線が腐食により破断する際に変化する電気抵抗値から腐食を検知する仕組みである。既往の報告によると、初期の塩化物イオン量が $0\sim 1.2\text{kg/m}^3$ の水セメント比70%の $400\times 400\times 100\text{mm}$ の試験体と塩化物イオン量が0の55%の試験体に腐食センサを設置して評価を行っている。試験体は10%濃度のNaCl水溶液中への浸漬と乾燥を繰り返し、鉄線の電気抵抗を計測した結果、以下の結論が得られている。

この実験結果を要約すると以下ようになる。

- 反応した鉄線の位置における塩化物イオン量は 12kg/m^3 であった。
- 未反応の試験体についても塩化物イオン量は $8\sim 10\text{kg/m}^3$ に達しており、腐食発生限界量をはるかに超えている。
- 鉄線部を設置するだけでは、腐食したとしても鉄線の破断に至らない可能性が高い。
- 鉄線部に微小電流を通電させてアノード分極させることで腐食への感度が高まる。
- アノード分極させた状態のセンサは、塩化物イオン量が $1.0\sim 2.4\text{kg/m}^3$ で破断（反応）する。

この結果は、鉄線が環境変化（例えば塩化物イオン量の増加）だけでは腐食検知が困難であることを示しており、常時、微小電流を強制的に通電させてアノード分極をさせなければ、適切に反応しないこと意味している。すなわち鉄線の抵抗変化だけでは、腐食を検知できないといえる。また、抵抗変化現象は、急峻であるものの、抵抗値が数 Ω 程度しか上昇していないと推察される。数 Ω 程度の微小抵抗の変化は、計測用ケーブルにも影響されることや、数 Ω 程度の上昇で腐食による破断と判断することは極めて困難と推察される。

3.1.2 鉄膜方式の腐食センサの性能

漢陽大学の李らは、 Al_2O_3 基板上に鉄膜を成膜し、 $13 \times 15 \times 0.5 \text{ mm}$ の非常に小さく薄いセンサを検討している^{2),3)}。このセンサは線状ではなくセラミックス基板上に鉄膜を成膜する製法で線幅を変えた成膜パターンの、各位置によって異なる抵抗値を有した仕様としている。

このセンサを NaCl 濃度 0~1.0% の水溶液中で 12 時間毎の乾湿繰り返しを行い、抵抗変化挙動を確認するとともに、水セメント比 50% のモルタル中に、NaCl 濃度を 0~0.3% まで練りこんだ水準と、3% NaCl 水溶液にて乾湿繰り返しを行い電気抵抗の挙動を計測している。なお、モルタルの乾湿繰り返し試験においてはセンサ設置位置のかぶり厚を 5~30mm に可変している。この実験結果を要約すると以下ようになる。

- NaCl 水溶液中においては、濃度 0.3% と 1.0% のみセンサの抵抗が上昇し、腐食を判定した。
- 塩分を練りこんだモルタル中では 0.1% および 0.3% の濃度のみセンサの抵抗が上昇し、腐食を判定した。
- かぶり厚を可変したセンサはかぶり 5mm, 10mm, 20mm が表面側から順に反応した。

この結果から膜状のセンサでは、武若らの鉄線センサに比べ、感度よく計測できる可能性が示されている。さらに、抵抗変化も大きいことから、汎用的なテストで計測できる領域であり容易に利用できる。一方、成膜された鉄膜の仕様、例えば鉄の純度や膜の詳細な組成等が詳しく記載されておらず、検知部であるパターンの物理的なサイズが不明である。パターンによって異なる抵抗値で形成する場合、鉄を素材として使うと高い導電率であることから、大きくサイズを変化させなければ明確に抵抗値は変化しないといえる。そのため、限られたサイズの基板上で異なる抵抗値をパターン（形状）のみで構成することは、物理的困難なため、素材の組成を変化させ導電率の異なる素材で成膜する等の工夫が必要となるが、その詳細は不明である。

3.1.3 既往の鉄筋腐食の評価手法

鉄筋腐食はコンクリート構造物の耐久性で最も重要な管理項目の一つであり、コンクリート内部における鉄筋腐食の現象解明やメカニズムの検討、鉄筋腐食の検知手法は多くの研究事例が存在する。

鉄筋腐食の検知手法としては、ASTM においても規格化されている自然電位法⁴⁾が最も一般的である。その他にも、分極抵抗法⁵⁾や電気抵抗（インピーダンス）の計測⁶⁾から評価する手法や装置も実用化され広く使われている。

自然電位法や分極抵抗といった従来手法は、鉄筋そのものを評価する手法であるため、鉄筋が健全な状態から腐食した状態に変化しなければ、腐食現象を捉えることが困難であり、事後保全的な手法といえる。また、これらの手法は鉄筋とコンクリート表面間の電位勾配や電流密度を計測することから、鉄筋にあらかじめケーブルを取りつける必要があることから、実際の構造物を計測する場合においては、コア抜きや研りが必要となり実用面では課題が多い。加えて、鉄筋とコンクリート表面間に存在するかぶりコンクリートが多くの塩分を含む場合は、導電性イオンである塩化物イオンの影響を受けて、極端に電位勾配が低下（卑になる）する場合もあり、適用状態によっては正確な評価が困難となるケースが存在する。

第2章で概説した実用化されたセンサのなかでも、検知部の電位変化や電流密度から腐食を評価するケースは多い。金属の腐食現象は電気化学的に説明できる現象として知られていることから、電位変化や電流密度で評価することは合理的な手法と理解できる。一方、コンクリートは通常、高いアルカリ性で保たれているが、経時的に空気中の二酸化炭素を吸収していくことから深さ位置によってpHが変化する。また、セメント、細骨材、粗骨材とサイズの異なる材料で構成されることから、必ずしも一様に密実な状態でなく、外部から浸透する水分、塩分、酸素のような腐食に関係する成分濃度の濃淡を考慮すると、理論的な電気化学現象で腐食を正確に評価することは困難な側面がある。そのため、自然電位の判定基準では「90%以上の腐食の可能性」「90%以上健全」「不明瞭」といった曖昧な判定基準が運用されていると考えられる。

3.2 鉄箔を用いた腐食センサの開発

既往の報告で示されたセンサ技術を参考として、従来手法である鉄筋腐食の評価方法の課題を解決すること、工業的に低コストで製造できるセンサを実用化することとして、鉄箔を検知部に適用したセンサの実用化を研究した。

開発のポイントは以下のとおりとした。

(1) 電気抵抗の変化で検知することとする

従来手法で用いられる電位変化は90%以上健全や90%以上腐食といった曖昧な評価要素が存在することから、センサ自身が腐食により確実に物理的な破断を示したことを簡便に計測できる手法とする。

(2) 既往の検討事例より検知感度を向上させる

李らの研究報告では0.1%の塩分濃度で腐食を判定したとある。それ以上の検知性能を目指す。

(3) センサを埋設することで対象構造物に悪影響を与えない。

(4) 工業的に大量生産が可能で、低コストで製造する構造

開発したセンサを広く社会に普及させるべく、低コストで大量に生産できる構造とする。

鉄箔は工業的に入手が容易な純度 99.99%、10 μ m 厚として、ポリイミドフィルム上に貼り付け、レジスト処理を施したうえで、ケミカルエッチングにて図 3-1 に示す回路パターン of センサを得た。このパターンの全体サイズは 30mm \times 30mm として、広く使われているコンクリートの最大骨材径である 20mm より一回り大きいサイズとしている。このことから、センサの正面に粗骨材が存在したとしても、粗骨材に妨げられることもなく、劣化因子がセンサに到達することを想定している。また、ポリイミドフィルムを基板にすることで、多少の湾曲であれば与えても問題はなく、フレキシビリティに形状を変化させることが可能である。

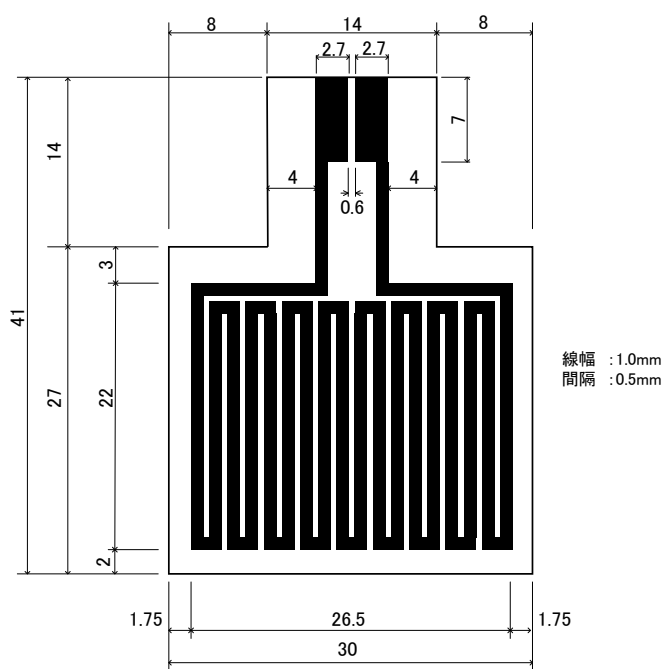


図 3-1 鉄箔センサの回路パターン

3.2.1 鉄箔センサの厚みの検討

鉄線をセンサに適用した検討においては、0.1mm の鉄線の抵抗値から腐食を判定することを試みている。この研究によると鉄線が腐食しても僅か数 Ω 程度の抵抗上昇により腐食判定を行う事としている。この結果は、センサケーブルによる抵抗変化分や、環境温度が変化した場合の抵抗変化を考慮すると腐食判定を適切に行えない可能性がある。

例えば、抵抗値は式 3-1 で算出されることから 0.1mm の鉄線が 10m 延長された場合は、100Ω 以上の変化に相当することから、数 Ω 程度の変化が腐食の発生によるものなのか、環境変化によるものなのか判別は難しい。

$$r = \rho \frac{l}{S} \quad \text{式 3-1}$$

ここで r：抵抗[Ω] ρ：抵抗率[Ω・m]，l：電線の長さ[m]，S：電線の断面積[m²]
鉄の抵抗率：1.00 × 10⁻⁷

仮にケーブル長さも環境温度も変化しないことを前提としても、数 Ω の変化を正確にとらえるには、汎用的なテストでは計測誤差に埋もれる可能性があることから、微小抵抗計といった特別な計測器を要する。

また、鉄線の腐食による抵抗変化が微小にとどまる理由としては、鉄線が腐食したとしても、表面の腐食にとどまり、完全な断線状態に至るまでに相当な時間を要することも一つの要因である。例えば、腐食により鉄線が完全に断線してしまえば、電氣的に絶縁状態になるため抵抗値は数 Ω の変化ではなく、けた違いに上昇するはずである。

鉄線によるセンサの課題を解決するべく、鉄箔を用いたセンサの検討を実施した。鉄箔を用いた理由として、劣化因子である塩分や水分を均等にとらえやすいことと、断面積を小さくできることから、表面的な腐食から断線に至る時間を短時間にしやすいと想定した。

3.2.2 鉄箔センサの腐食判定を行う抵抗値の検討

鉄線センサと本発明である鉄箔センサのそれぞれについて腐食現象の進展に伴う抵抗値変化を、2 種類の腐食進展モデルから検討し、断線現象を判断するに適正な抵抗値を導き出した。モデル検討を行う上で、鉄箔センサおよび鉄線センサに対して腐食因子が表面から浸食する可能性を同一とするため両端部を除く表面積を同一とし、センサ長さも同一とした。鉄線センサは直径 0.1mm とし長さを 50mm に設定し、鉄箔センサは、厚み 10μm、長さ 50mm とし、基材のフィルムに面している面は腐食因子の浸食を受けないため、それ以外の表面積が鉄線センサの表面積と同等になる幅を算出した。それらの形状条件と鉄の抵抗率より理論抵抗値を計算し、各腐食モデルで抵抗値の変化を図示した。腐食モデルは下記の 2 条件とした。

- ① 腐食因子がセンサ両端部を除く表面積全体に浸食し、全ての長さ方向に対し一様に腐食が進展し、センサ断面積が減少していくモデル①

- ② センサの一部が腐食因子により浸食されその部分のみ断面積が減少していくモデル②

図 3-2 の概念図のとおり理論抵抗値がセンサ形状の違いによって、どのように変化するか検討を行った。なお、モデル 2 においては、局所腐食部の長さを 0.1～10mm で検討した。

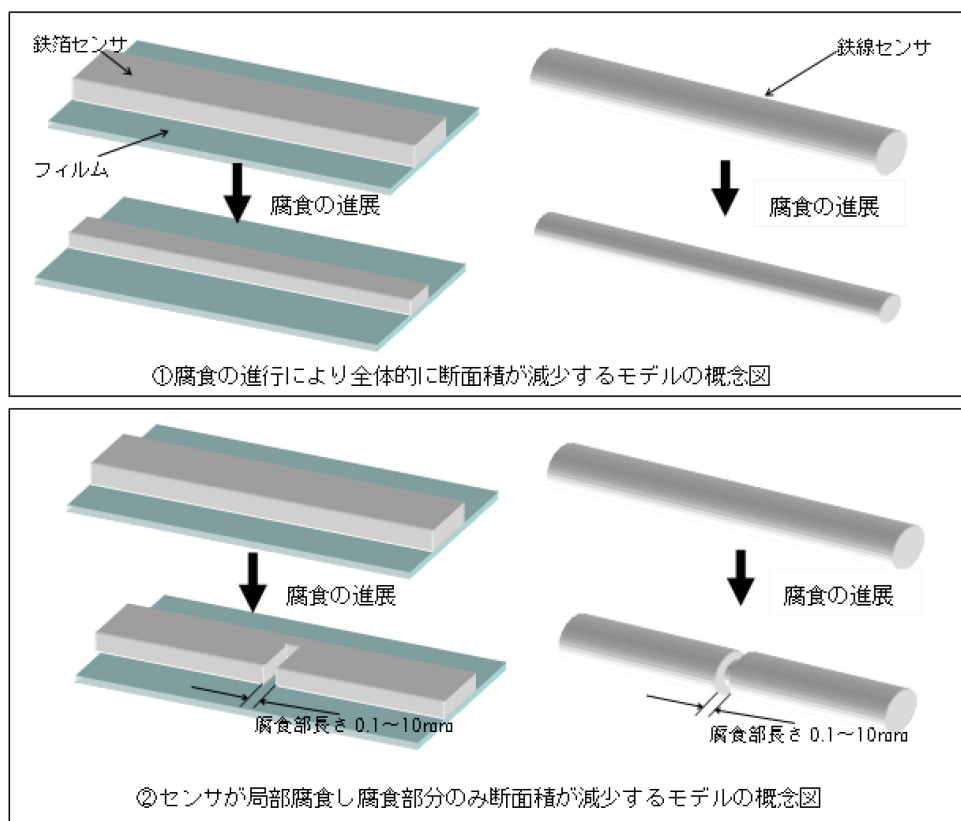


図 3-2 センサの腐食判定を検討するためのモデル

図 3-3 に示すモデル①で計算した鉄線，鉄箔それぞれの抵抗値変化を示す。この結果からわかるように，モデル①の腐食現象の場合，鉄線センサと鉄箔センサの抵抗変化傾向はほぼ同等となる。

モデル①では鉄線の断線判断基準である数 Ω 程度の変化は，断面積残存率がおおよそ 40～70%もあり，断線状態と判断することは困難である。

但し、腐食現象は一般的にも偏在して発生することや一部の腐食部が進展していくことが知られており、更に対象とするコンクリート中での利用を想定するとコンクリートの不均一性も影響しモデル①のように均等に腐食するとは限らない。そこで、より現実的なモデルとして②のように、一部の腐食が進展し断面積が減少していく場合の検討を行い、その現象が複数箇所でおこる場合を対象とするため、腐食部の長さを変え検討した。

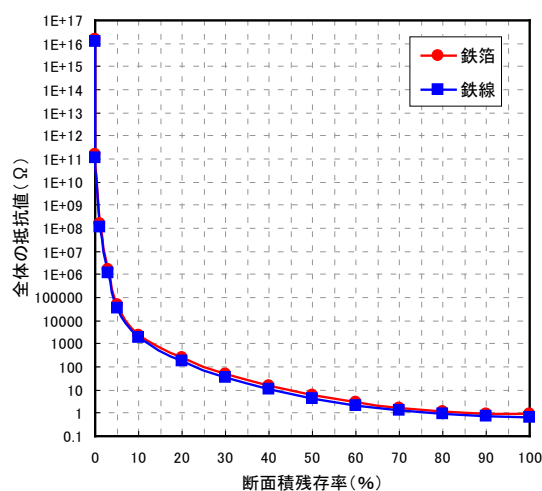


図 3-3 モデル①における抵抗値と断面積残存率の理論的变化

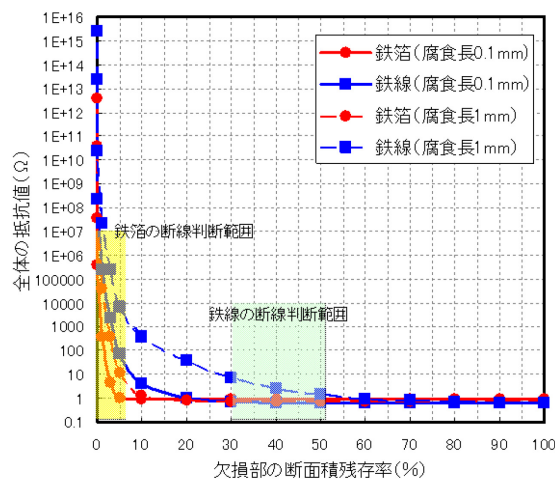


図 3-4 モデル②における抵抗値と断面積残存率の理論的变化

図 3-4 にモデル②の計算結果を示す。モデル②では、断線が近づくにつれ鉄箔と鉄線の違いが明らかとなっている。

鉄線では腐食部の長さが長くなるにつれ、断面積残存率の影響を受けやすい傾向となる。例えば、断面積残存率が5%以下となった時点「ほぼ断線」と判断するとした場合、鉄箔では数 Ω ～数百 Ω の範囲、鉄線では、数百 Ω ～数 $K\Omega$ の範囲が断線判断をするに適した値と言える。

鉄線を数 Ω の変化で断線を判断すると、欠損部の断面積残存率は40～60%の時点で断線を判断しているすることとなる。また、 2Ω 程度の微小な抵抗変化はコンクリート中の骨材がセンサ表面に衝突しキズを与えたり、施工中にセンサが折れ曲がったりすることによっても変化する現れる可能性があることから実用的な判断値とは言い難い。

一方、鉄箔センサは断面積残存率5%以下で抵抗値が急激に上昇することから、断面積が95%欠損し、ほぼ断線したと言える領域で断線を判断できる。

また、鉄線に比べ、鉄箔では断線付近で急激な抵抗の変化を生じるため、断線判断を行う範囲が狭く確度の高い検知性能が得られる。

コンクリート中の腐食現象は必ずしも本検討のモデルのみで表されるのではなく、モデル①とモデル②の複合的な腐食モデルも十分考えられる。その場合、図3-4が図3-3に近づく傾向となる。その場合においても鉄線センサを用いて数 Ω の変化で断線を判定することは、より困難となる。

これらの計算結果より、鉄箔では 10Ω ～数百 Ω の範囲、鉄線では、数百 Ω ～数 $K\Omega$ の範囲が断線判断をするに適した値と言える。

以上のことから、鉄箔状のセンサは鉄線状のセンサより、電気抵抗の測定値で判定することに適しており、断線状態を把握するには 10 ～数百 Ω に変化した時点で腐食を判断すればよいと考えられる。

更に、既往の鉄線センサの検討においては、腐食が促進するようアノード分極を促す微小電流を付与することとなっているが、鉄箔センサにおいても異種金属間に発生する電位差が常時生じる構造とし、腐食発生後は電池効果により速やかに断線に至るようセンサ端部に金蒸着を施し、異種金属間に発生する電位差が常時生じる構造とした。(図3-5)

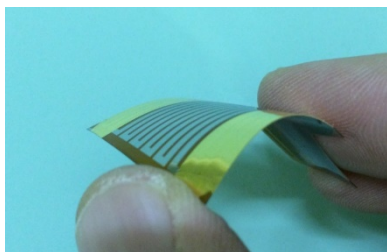


図 3-5 鉄箔を用いた腐食環境センサの外観

3.2.3 模擬溶液による鉄箔センサの腐食検知性能試験

(1) 鉄箔センサの腐食検知性能の確認実験

鉄箔センサの基本的な腐食検知性能を確認するために、コンクリート中を模擬した飽和水酸化カルシウム溶液中に鉄箔センサを浸漬して実施した。この実験は溶液で行うことで pH や塩化物量の環境を均一に保てることや、試験体であるセンサや比較対象の鉄片を目視で確認でき、試験途中に都度取り出すことが容易であるためである。

図 3-6 に性能試験の状況を示す。試験溶液に使用した水酸化カルシウム溶液は、表 3-1 に示す環境を保つために、大気中の二酸化炭素と反応して試験溶液の pH が低下する影響を防ぐことを目的に、エアポンプからの空気を飽和水酸化カルシウム水溶液に一度通気し、二酸化炭素を除去したのちに試験槽内に供給した。

なお、定期的に試験溶液の pH を計測し、試験溶液の pH に変化が無いことを確認した。センサの破断は、試験開始後、センサの抵抗値が 100 Ω 以上を示した時間を破断時間とした。各試験水準のセンサ数は 5 個とした。

(2) 模擬溶液の腐食速度の確認

各塩化物イオン濃度のコンクリート模擬試験溶液における鋼材の腐食速度を把握するために、比較用鋼材 (SS400, 20×80×t2mm) を鉄箔センサと同じ構成の試験装置を使用して浸漬させた。鋼材の腐食速度は、表 3-1 に示した各水溶液に鋼材を浸漬させ、試験前後で変化した鋼材の質量を計測することで求めた。各試験水準の鋼材は 5 枚とした。

鋼材の質量計測は、試験開始から 36 日後に鋼材を塩酸と腐食抑制剤の混合溶液に浸漬させ、除錆後に鋼材の質量を測定した。この値から試験前の鋼材質量を差し引くことで、鋼材の質量減少量を求めた。

表 3-1 模擬溶液の塩分濃度

Cl ⁻ (ppm)	
sat. Ca(OH) ₂ pH 12.3 to 12.5	200
	500
	1000
	2000
	5000

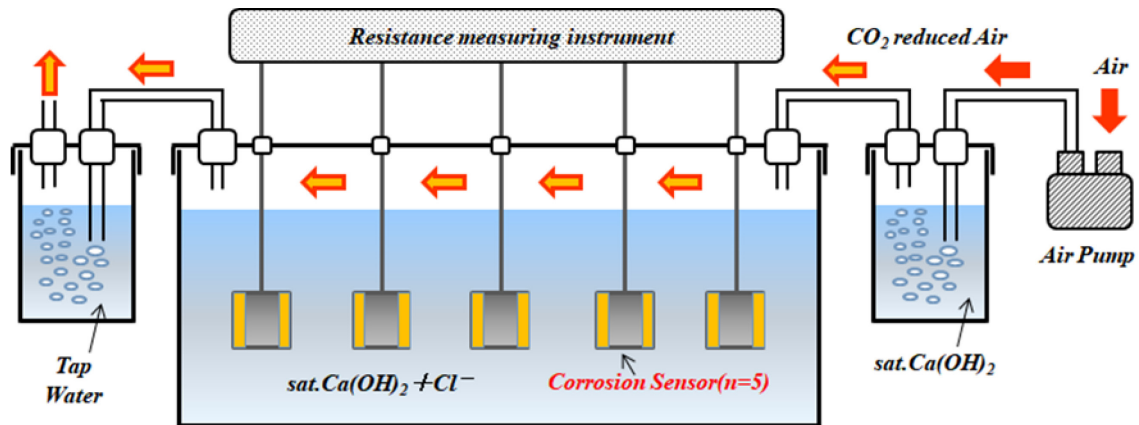


図 3-6 コンクリート模擬溶液を使った鉄箔センサの性能試験

(3) 鉄箔腐食環境センサの検知性能試験の結果

図 3-7 に鉄箔センサの破断時間を示す。塩化物イオン濃度 5000ppm の条件が最も早く、塩化物イオン濃度 200ppm の条件においては、2500 時間まで破断が見られなかった。また、塩化物イオン濃度の低下に伴い、センサ破断時間のバラツキが大きくなる傾向が確認できる。特に塩化物イオン濃度 500ppm では、最大 1700 時間(約 70 日)もの差が生じた。塩化物イオン濃度 500ppm と 5000ppm においては平均破断時間において 1000 時間程度の差が生じた。

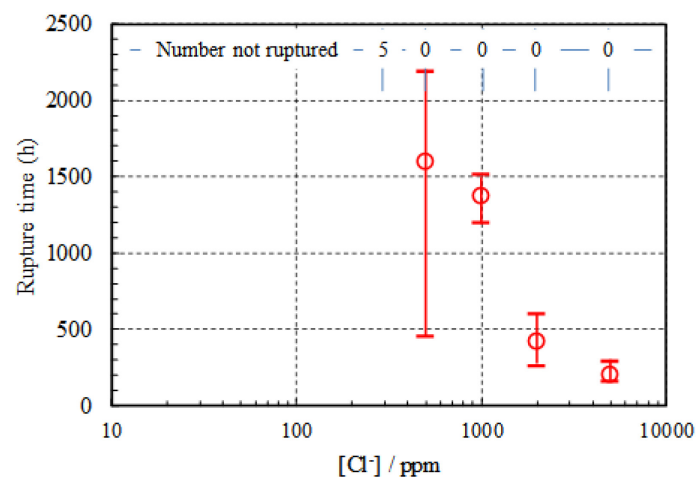


図 3-7 各塩化物イオン濃度における腐食環境センサの破断時間

また、図 3-8 の横軸を pH が 12.1 として Cl^-/OH^- に換算した結果を図 3-11 に示す。 Cl^-/OH^- が 0.71 以上になると鉄箔センサは破断に至っている。

Cl^-/OH^- を基準とした鋼材の発錆限界値については諸説あるが、その値は 0.6～1.0^{7),8)} の範囲内にあると報告されており、本試験結果は既報の範囲内にあり、妥当な感度でセンサが発錆・破断に至ったものと判断できる。

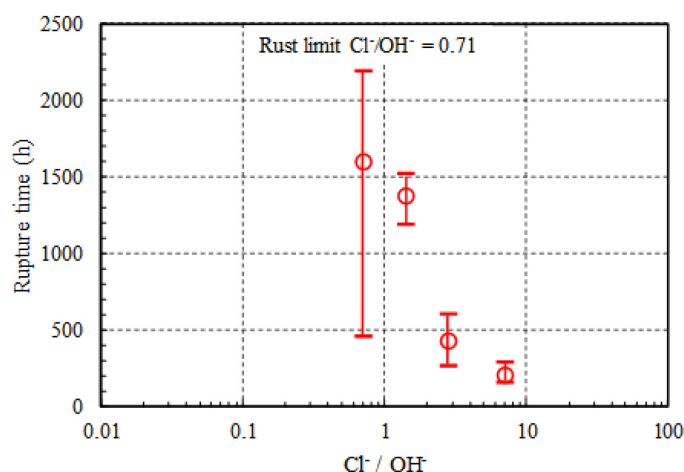


図 3-8 鉄箔センサの破断時間と Cl^-/OH^- の関係

(4) 鋼材の腐食速度試験結果

図 3-9 に各種水溶液中における鋼材の腐食速度を示す。本試験では、塩化物イオン濃度 200ppm の試験溶液における鋼材腐食速度は 0 mm/y(腐食無し)を示し、500ppm から濃度が高くなるとともに腐食速度が大きくなった。この結果は、図 3-10 に示した腐食環境センサの破断時間の傾向と同様な結果といえる。なお、塩化物イオン濃度 500ppm における腐食速度は 0.0001 mm/y と極めて小さな腐食速度であった。なお、海水中における鋼材の腐食速度は 0.1 mm/y であることから、鋼材の腐食速度が約 0.001mm/y の条件下でセンサが破断に至ることは、本センサが塩化物イオン濃度に対して非常に感度良く反応する性能を有しているといえる。

なお、アルカリ中の鋼材は、酸素の供給により不動態皮膜が強固となりやすいが、本試験においては、空気を投入していることから酸素分圧が自然に近い状態でコンクリート模擬溶液に投入されているといえる。腐食速度を評価するうえでは酸素分圧の過剰な上昇を抑える必要があるといえる。

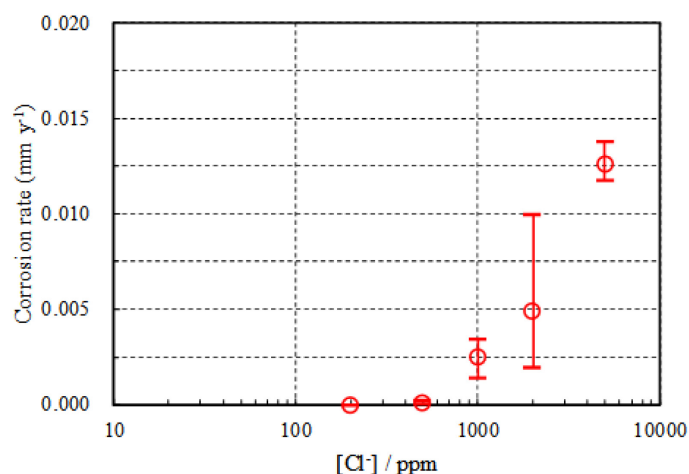


図 3-9 各塩化物イオン濃度環境における鋼材の腐食速度

これらの実験結果より以下のことが明らかとなった。

- 1) 腐食環境センサは塩化物イオン濃度 500ppm の環境にて腐食による破断が生じ、塩化物イオン濃度が増加するほど破断時間は短時間になる。この結果は李らの検討したセンサの感度である 0.1%Cl 濃度の 1/2 の 0.05%で検知できる非常に高い感度を有するセンサといえる。
- 2) 腐食環境センサが破断する塩化物イオン濃度 500ppm の環境は、腐食速度 0.001mm/y mm/y であり、腐食環境センサが非常に高感度に反応する性能を有している。

3.2.4 塩分を練りこんだモルタル内の鉄箔センサの性能検証

(1) 実験方法

あらかじめ塩分を練り込んだ普通セメントモルタル中に、鉄箔センサを埋設して塩分による検知性能を評価した。実験は、水セメント比 65%、細骨材容積率 60%のモルタルに、塩分(Cl)を 0, 1.2, 2.4, 4.8, 9.6kg/m³ の 5 水準で添加し、成形・硬化後に腐食促進養生を開始した。なお、塩分添加量は、単位水量 165kg/m³ のコンクリートに換算すると、概ね 0, 0.75, 1.5, 3.0, 6.0kg/m³ に相当する。モルタル試験体の概要を図 3-10 に示す。センサの設置位置は曝露面から 15mm 位置とした。試験体は、材齢 12 日まで封緘養生したのち 5 面を樹脂被覆し、材齢 14 日より図 3-11 に示すパターンで水中浸漬・乾燥による促進養生を行った。各々の試験水準のセンサ数は n=9 とし、検知性能はセンサの電気抵抗の変化により評価した。

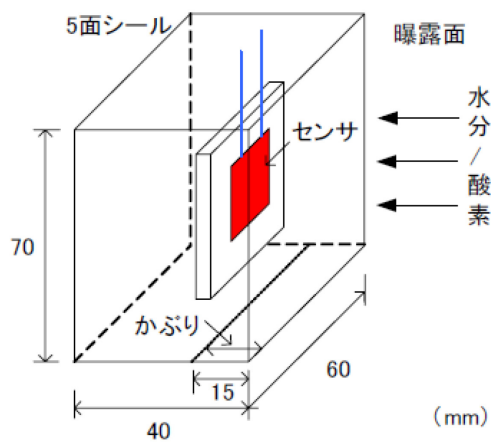


図 3-10 鉄箔センサを埋設したモルタル試験体

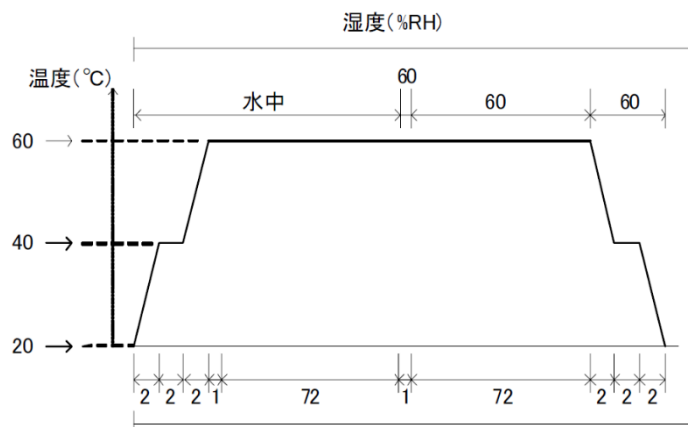


図 3-11 モルタル試験体の促進試験サイクル

（２）結果と考察

塩分を練り込んだモルタル中のセンサの抵抗変化を図 3-12 に示す。サイクル数の増加に伴い検知部の抵抗は著しく増大し、塩分添加量が多いと早期に変化する傾向が認められた。一方、塩分を添加しない水準では抵抗の増大は認められなかった。試験体を割裂し目視観察した結果、抵抗の増大が認められたセンサではいずれも検知部に明瞭に腐食の発生が確認され、検知部の抵抗の増大は腐食に起因したものと考えられた。センサの抵抗変化について閾値(100Ω)を設定し、閾値を超えた場合を腐食検知として整理した結果を図 3-13 に示す。センサの検知割合（閾値を超えたセンサ数/埋設したセンサ数）は、塩分量が多いほど早期に高くなり、添加量が 2.4kg/m³（コンクリート換算≒1.5kg/m³）以上では全数が

腐食検知に至っている。一方、添加量が 1.2kg/m^3 (コンクリート換算 $\approx 0.75\text{kg/m}^3$)では本実験期間内では全数検知には至らず、この添加量の近傍に本センサの検知性能の境界があるものと推察された。

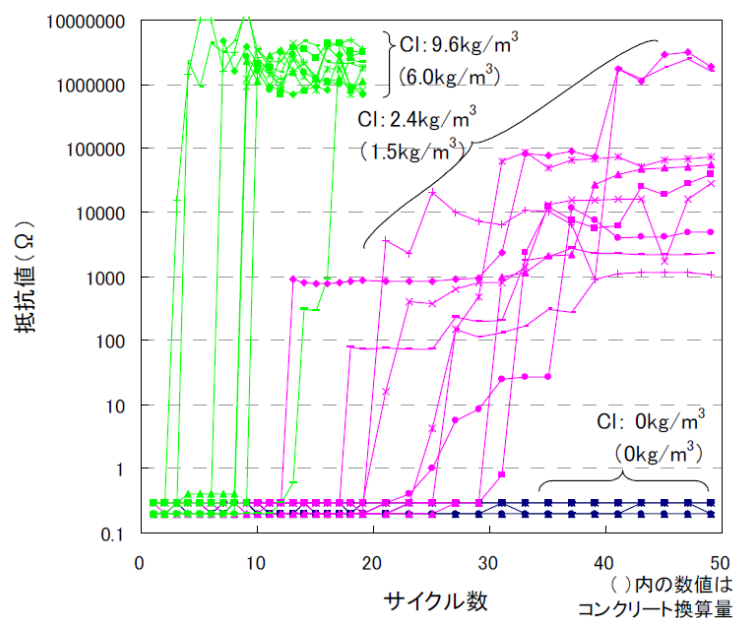


図 3-12 モルタルの塩分練り込み量とセンサの抵抗変化
(Cl 量 : $0, 2.4, 9.6 \text{ kg/m}^3$)

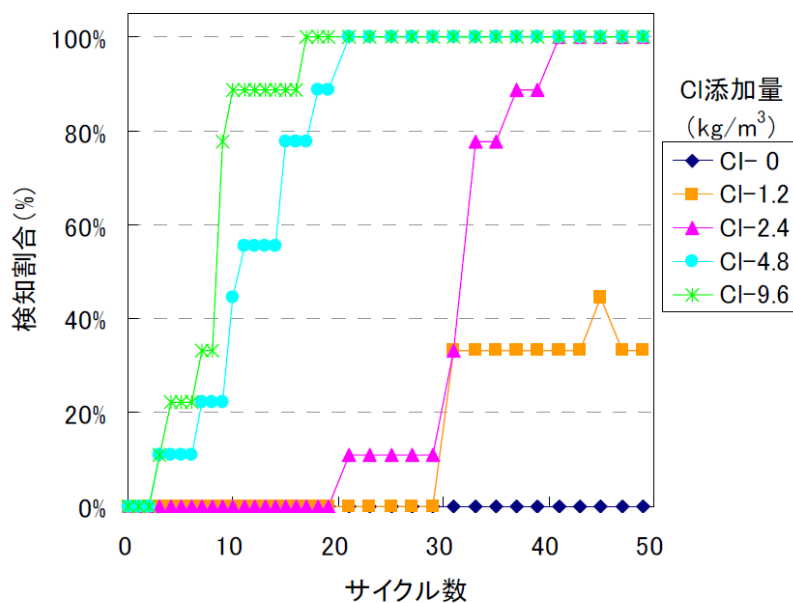


図 3-13 モルタルの塩分練り込み量と閾値を用いたセンサの腐食の検知割合

3.2.5 コンクリート内部における鉄箔センサの性能検証

(1) 実験方法

コンクリート内部に鉄箔センサを設置して，外部からの塩分浸透による検知性能の評価実験を行った。

試験に用いたコンクリートの配合を表 3-2 に示す。試験体は図 3-14 に示す通り 100×100×200(mm) の角柱とし，かぶり位置 25mm および 40mm にセンサを設置した。センサは各試験体 3 個とし，かぶり水準ごとに 2 体ずつ試験体を作製した (n=3×2=6)。試験体はコンクリートの打設後材齢 26 日まで封緘養生し，浸透面以外の面を樹脂被覆して，材齢 28 日より 10%NaCl 水溶液浸漬・乾燥による図 3-15 に示す腐食促進養生を行った。計測は 1 サイクルごとにセンサの電気抵抗を測定した。また，塩分浸透性状を把握する目的で，促進 7 サイクルおよび 12 サイクルにおいて試験体を切り出し，EPMA によりコンクリート中の塩化物量を定量分析した。

表 3-2 実験に用いたコンクリート配合

目標スランプ(cm)	目標空気量(%)	W/C (%)	s/ a (%)	単位量 (kg/m ³)			
				水	セメント	細骨材	粗骨材
10-15 程度	4.5±1	55	45	165	300	801	991

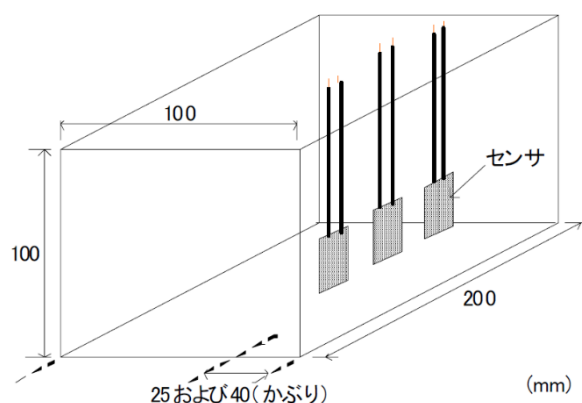


図 3-14 鉄箔状センサを埋設したコンクリート試験体

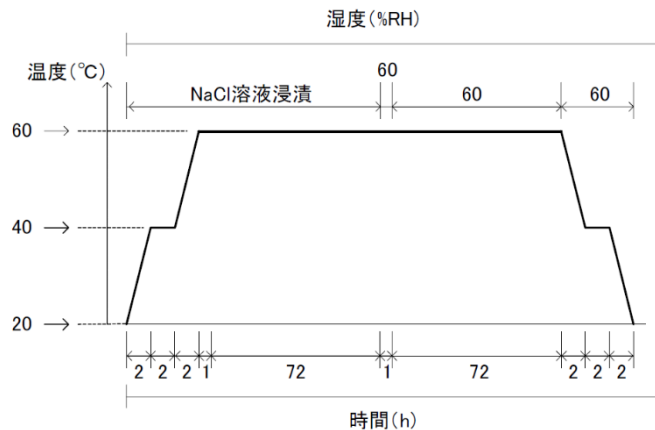


図 3-15 コンクリート試験体の促進養生サイクル

(2) 結果と考察

コンクリートの塩分浸透にともなうセンサの抵抗変化を図 3-16 に示す。かぶり位置 25mm および 40mm に設置したセンサは、個々のセンサで抵抗が増大したサイクル数に差は認められるが、どのセンサも急激な抵抗変化が確認された。

試験後に EPMA にて分析して得られたコンクリートへの塩分浸透状況を図 3-17 に示す。サイクル数に伴って、Cl がコンクリートに浸透する状況が確認できる。

コンクリートの深さ方向の Cl 量分布から得られた拡散式 (式 3-1) の係数 (表 3-3) は、7 サイクルおよび 12 サイクルでほぼ一致する結果となった。この係数を用いてかぶり 25mm および 40mm 位置の Cl 量の経時変化を算出し、コンクリート中センサの腐食の検知割合との関係を比較した結果を図 3-18 に示す。

センサの腐食検知開始時および全数検知時に対応した Cl 量は、かぶり 25mm で開始時 1kg/m^3 ～全数検知時 4.5kg/m^3 、かぶり 40mm で開始時 0.5kg/m^3 ～全数検知時 1.5kg/m^3 程度であった。これらの差異はコンクリートの不均質性によって生じる部分的な Cl の浸透差等の影響を受けた可能性があるが、以上の検討から、本センサを用いてコンクリート中の鉄筋 (鋼材) の腐食環境を間接的に検知することが可能であるものと考えられた。

$$C(x,t) = C_0 \cdot [1 - \text{erf} \{0.5 x / (C_p \cdot t)^{0.5}\}] \quad \text{式 3-1}$$

$C(x,t)$: 塩分量, C_0 : 表面塩分量, C_p : 見かけの拡散係数 x : 浸透面からの距離,
 t : 任意の時間

※ t =サイクル数として回帰

表 3-3 拡散式における表面濃度と見かけの拡散係数 ($R=0.98$ 以上)

回帰サイクル	表面濃度(kg/m^3): C_0	見かけの拡散係数: C_p
7	15.9	0.194
12	16.0	0.200

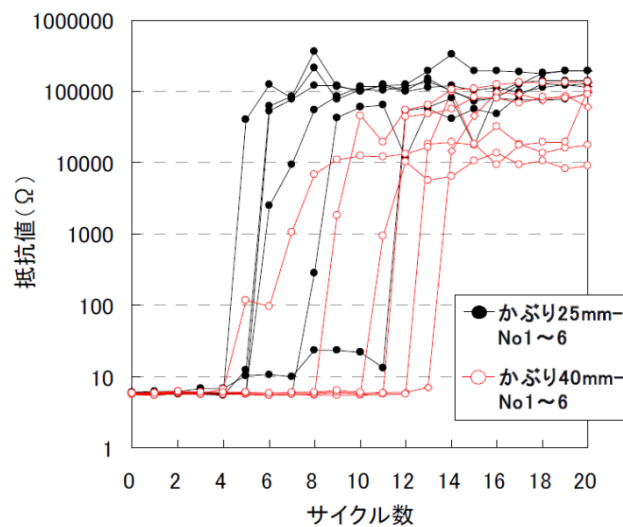


図 3-16 コンクリート中のセンサの抵抗変化
(かぶり 25mm 位置および 40mm 位置)

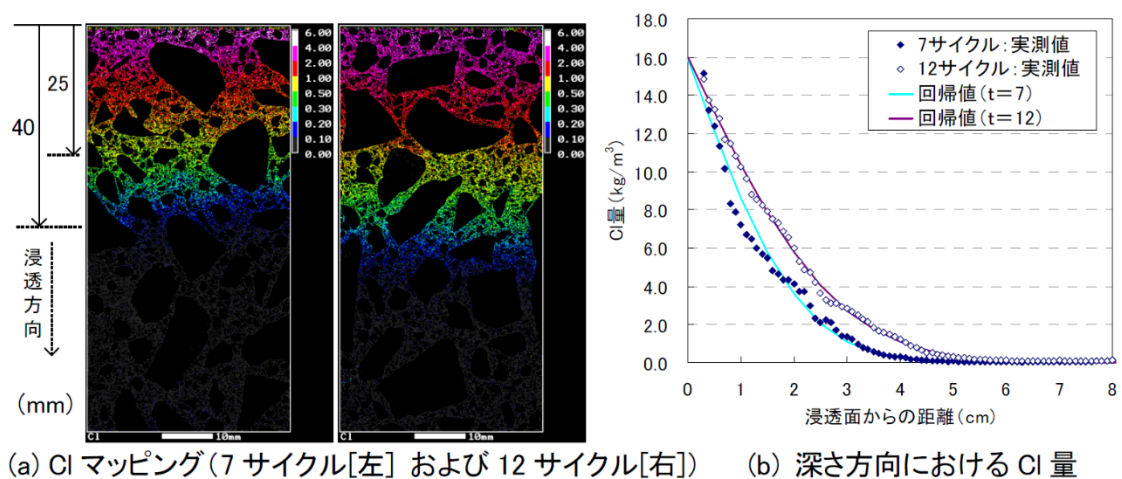


図 3-17 EPMA で分析したコンクリート試験体への塩分浸透状況

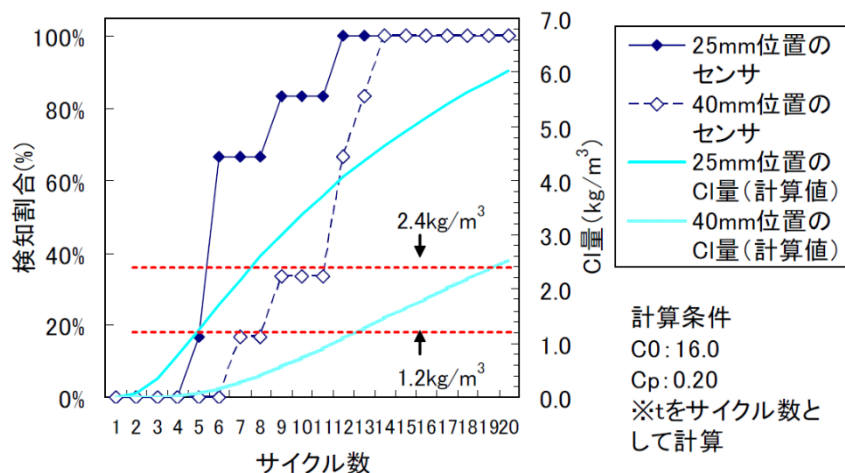


図 3-18 センサの腐食の検知割合と Cl 量の変化
(かぶり 25mm 位置および 40mm 位置)

本項で確認した鉄筋センサの性能から、既往の研究で検討されたセンサの性能を上回る感度を有するセンサを構成することができ、モルタルおよびコンクリート中においても十分な性能を有している。

3.3 鉄筋センサの外装・筐体の検討

鉄筋センサのサイズは $30 \times 30\text{mm}$ としている。これはセンサが粗骨材に隠れてしまい腐食因子の到達を妨げられないように配慮している。鉄筋センサは実際の施工を考慮すると、何らかの筐体に入れ、施工作業を簡便にすることや、作業時に落下させても鉄筋センサ自体を傷つけないためである。

実用性を鑑みたセンサの外装を図 3-19 に示す。センサの筐体は高強度モルタルもしくはステアタイトというセラミックスで構成される。また、図 2-10 に示すとおり、サイズは既往のセンサより薄く体積も小さい。筐体のステアタイトはセラミックス材料の中では、熱膨張率が $7.8 \sim 8.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度でセラミックスの中では、コンクリートに近い特性を保有しており、橋梁のインサート素材にも活用されている実績を有する。鉄筋センサの表面には、2mm 厚のモルタルでカバーされている。鉄筋センサは非常に感度が高いことから大気中に放置しておくと、周囲の水分等で早期に表面に錆が生じる。従って、そのまま施工して放置してしまうとコンクリートを打込む前に、腐食する恐れがある。そのため、コンクリートを打ち込む前まではアルカリ環境を付与し、腐食させないためにカバーモルタルで封じている。カバーモルタルはコンクリート打込みまでの鉄筋セ

ンサの腐食を妨げる役割であるが、コンクリート打込み後は、塩分や炭酸ガスといった腐食因子を妨げてしまうと検知精度の低下を招いてしまう。そのため、配合を工夫して、NaCl3%水溶液は1日でセンサに塩分が到達し、中性化についても促進中性化試験で1日、気中暴露試験にて28日程度でカバーモルタルが中性化することを確認しており、腐食因子を妨げることはない。

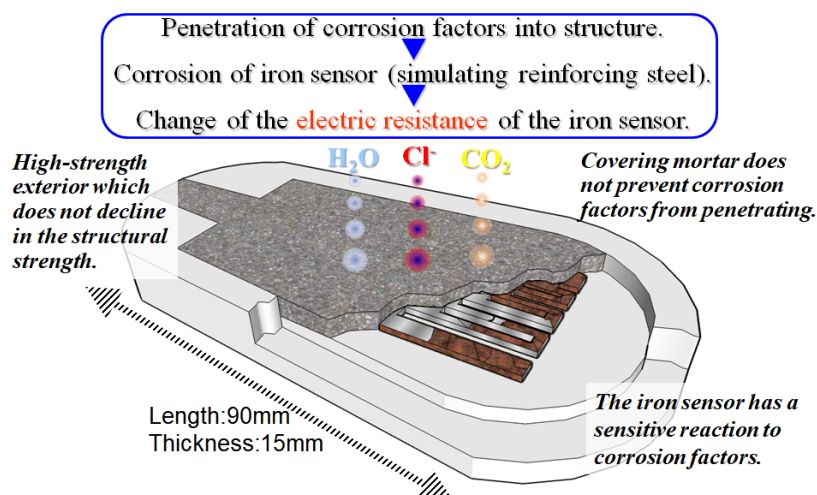


図 3-19 鉄箔センサの外装構成

3.4 電気防食工法における犠牲陽極モニタリングセンサへの応用検討

前項で示した、鉄箔センサは、単純に腐食を検知するセンサであるが使用方法によっては、新しい可能性がある。本項では流電陽極方式の電気防食工法に用いる犠牲陽極のモニタリングへ適用可能か検討を実施した。

電気防食工法は鉄筋腐食対策の最終手段と言われる維持管理方法であり、防食電流を鉄筋に供給することで鉄筋腐食を抑制する工法である。電気防食工法は外部の電源装置を用いて防食電流を流す外部電源方式と、犠牲陽極と鉄筋のイオン化傾向の差を使って防食電流を流す流電陽極方式に大別される。いずれの方式においても防食電流を安定的に供給することが重要であるため、外部電源方式は外部の電源装置が停止しないように維持する必要がある。流電陽極方式は外部電源方式の電気防食に比べ、電源装置を必要としないため、設置後の管理労力やランニングコストが抑制できる。

流電陽極方式の電気防食工法には様々な方法が提案されている。コンクリート構造物表面に犠牲陽極を設置する方法としては、陽極となるパネルやシートを設置する方法⁹⁾や、溶射により表面に塗膜する方法¹⁰⁾が提案されており、コンクリート内部に犠牲陽極を埋設する方法としては、犠牲陽極をバックフィル材

に包含した部品を鉄筋と接続し設置する方法¹¹⁾が実用化されている。

犠牲陽極をコンクリート内部に埋設する方法は、表面に犠牲陽極を設置する方法に比べると、新設時に配筋作業と同時に施工できることから、施工労力を抑えることが可能である。また、断面修復等の補修時には、補修材にポリマー入りの電気抵抗が高い材料を用いても犠牲陽極を包含するモルタル材料により一定の導電性を保持することで、防食電流を供給することが可能である。それらのことから様々な適用事例がみられる。

一方、犠牲陽極をコンクリート内部に埋設する場合、犠牲陽極が消耗しながら防食電流を鉄筋に付与することから、犠牲陽極の消費状態をある程度把握できることが望ましいが直接的には確認できない。すなわち、犠牲陽極の防食効果の確認や犠牲陽極自身の更新時期の判定が困難という課題がある。

そこで、犠牲陽極の状態をモニタリングすることを目的に、鉄箔状のセンサと亜鉛線を接続し、防食効果の確認に加え、防食効果が低下した後の腐食検知性能を各種の溶液を用いて確認試験を行い、その結果より流電陽極方式の電気防食工法における適用性を評価した。

(1) 実験方法

流電陽極方式の防食工法を模すために、図 3-20 に示すとおり腐食センサと犠牲陽極の亜鉛線を用いケーブルにより半田付けで接続した。

亜鉛線は 99.99%の純度のものを使用し海水中における防食時の陽極必要量を文献¹²⁾に基づき式 3-2 より計算し、0.5mmφ と 1mmφ の 2 水準とした。式中 I_i は軟鉄系に用いられる 100 を代入し、陽極の有効電気量は 780 を用いた。亜鉛線は露出部を 6mm に調整し、それ以外の露出部を樹脂でコーティングし防水処理を実施した。

なお、式 3-2 で計算した防食期間の設計値は 1mmφ の亜鉛線で 288 時間、0.5mmφ の亜鉛線で 72 時間の防食期間である。

$$W = \frac{I_i \times A_i \times L \times 8.76}{C} \quad \text{式 3-2}$$

W：陽極の合計質量 [kg]

I_i ：計画防食電流密度 [mA/m²]

A_i ： I_i に対する防食対象部材の表面積 [m²]

L：陽極の耐用寿命 [y]

C：陽極の有効電気量 [A・h/kg]

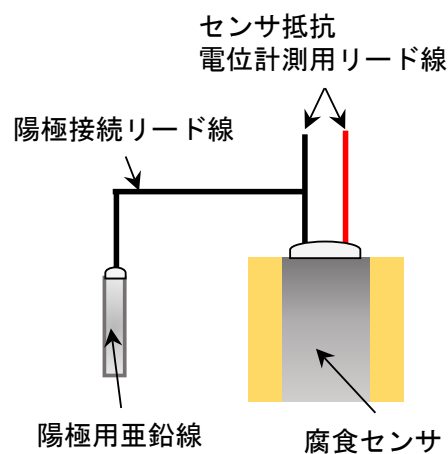


図 3-20 腐食センサと亜鉛線の接続状態

表 3-4 に試験に用いた溶液の種類を示す。ケース 1 として人工海水を用いた浸漬試験を実施し、ケース 2 としてコンクリート模擬溶液を用いて浸漬実験を実施した。

表 3-4 試験に用いた溶液

	塩分濃度(%)	pH	酸素濃度(ppm)
ケース 1	3	7.7	6
ケース 2	10	12.3	6

(2) 人工海水中における基本性能の確認 (ケース 1)

ケース 1 として人工海水中における腐食センサと亜鉛線の接続状態の防食効果について、腐食促進試験を実施した。試験方法として、図 3-21 に示す溶液槽に 3%塩分濃度に調整したイオン交換水に空気をポンプで投入し、腐食センサ単体（無防食）と亜鉛線を接続した犠牲陽極付き腐食センサを、それぞれ $n=3$ で浸漬した。

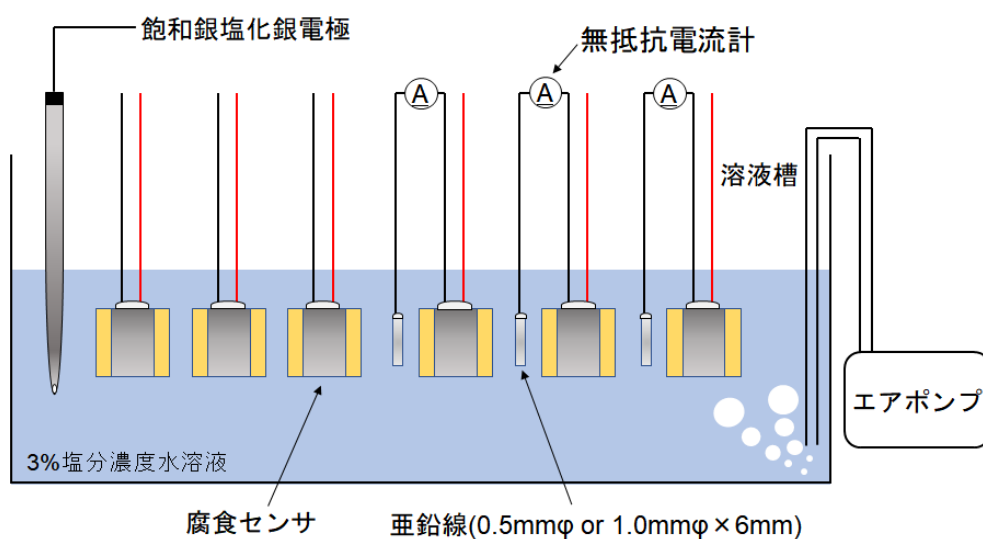


図 3-21 腐食促進試験の構成（ケース 1）

計測項目は飽和銀塩化銀電極を用いて腐食センサ亜鉛線の自然電位と復極量を定期的に計測するとともに亜鉛線・腐食センサ間に発生する防食電流を計測した。なお、防食電流は無抵抗電流計を用いて計測し、復極量は溶液中であることから IR ドロップの影響は除外した。また、腐食センサが腐食を判定する抵抗値に達した時点の表面状態を目視で確認した。

試験期間中における水溶液の環境変化についても、定期的に溶存酸素濃度と pH を計測して変化がないことを確認している。

（３）実験結果（防食性能の変化）

図 3-22 に亜鉛線－腐食センサ間で計測した電流密度の経時変化を示す。電流密度は、計測した電流値を腐食センサの検知部分の表面積で除した値、すなわち防食対象面積における電流密度とした。

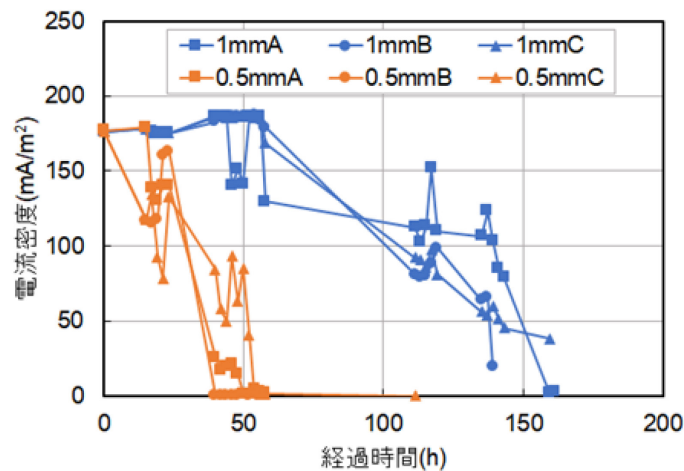


図 3-22 陽極亜鉛線の電流密度の変化(ケース 1)

試験開始直後の電流密度は、設計時に用いた 100 mA/m^2 を上回り 170 mA/m^2 を示し、水溶液浸漬直後が最も高く時間経過に伴い減少傾向を示した。1mm ϕ の亜鉛線については、60 時間程度まで試験開始時の電流密度を保ち、その後減少傾向を示し 130 時間以降で最低値を示した。0.5mm ϕ の亜鉛線は試験開始直後から急速に減少傾向となり 45~60 時間でほぼ最低値を示した。

図 3-23 に 0.5mm ϕ の亜鉛線水準の腐食センサおよび亜鉛線の電位計測結果を示す。腐食センサは -600 mV vs SHE から 40 時間経過時点で若干卑下傾向となった。亜鉛線の電位は開始直後から貴な方向に変化し、各個体差によるバラつきは大きい。20~50 時間の時点で大きく貴な方向に変化した結果となった。0.5mm ϕ については、この亜鉛線の電位変化に併せ試験開始直後から電流密度も急速に減少していることから、防食環境を安定的に維持できていないと推察される。

図 3-24 には 1mm ϕ の亜鉛線水準の腐食センサおよび亜鉛線の電位変化を示す。腐食センサの電位は約 100 時間程度まで開始直後と同様の -600 mV vs SHE を示し、その後卑化傾向となった。亜鉛線の電位は開始直後から 100 時間まで徐々に貴化傾向に上昇し、その後は大きな変化はなく横ばいとなった。また、0.5mm ϕ と比較すると個体差によるバラつきが少ない結果であったことから防食環境を安定的に維持できていると考えられる。

0.5mm ϕ 、1mm ϕ のどちらの結果においても防食設計時間である 72 時間、288 時間を大きく下回る結果であった。この理由としては、ポンプから水溶液中に投入した空気により溶液内に流速が発生したことが影響して酸素拡散速度が上昇したことから腐食速度が促進されたと推察している。また、電流密度が設計時の 1.7 倍程度であったことから同様のことが考えられる。

図 3-25 に腐食センサ単体と 0.5mm ϕ , 1mm ϕ の亜鉛線を接続した腐食センサの抵抗変化を示す。腐食センサ単体（無防食）においては数時間から 35 時間の間にすべてのセンサが腐食状態を示し、0.5mm ϕ の亜鉛線防食については 50～100 時間で腐食に至った。1mm ϕ の亜鉛線水準は 140～160 時間ですべてのセンサが腐食に至った。

防食有無に関わらず腐食検知時期はいずれの試料においても個体によるバラつきは認められる結果ではあるが、無防食→0.5 mm 亜鉛線防食→1mm ϕ 亜鉛線防食の順番で 100 Ω を超える抵抗値を示すまでの経過時間が長時間となっており 1mm ϕ については無防食に比して約 3 倍の時間を要しており、防食効果が得られたと考えられる。

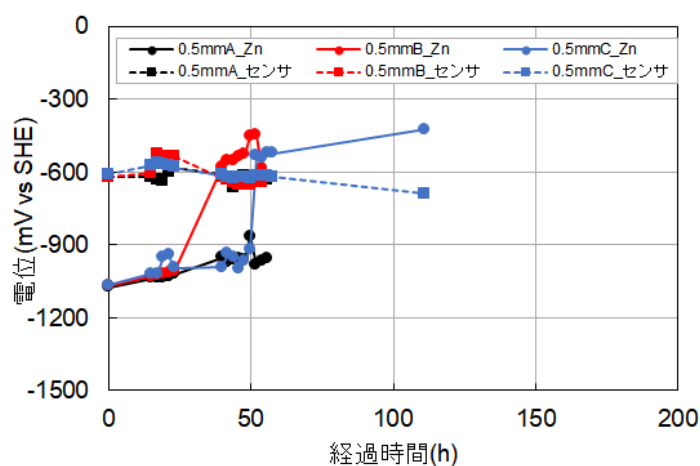


図 3-23 0.5mm ϕ 陽極亜鉛線と腐食センサの電位変化(ケース 1)

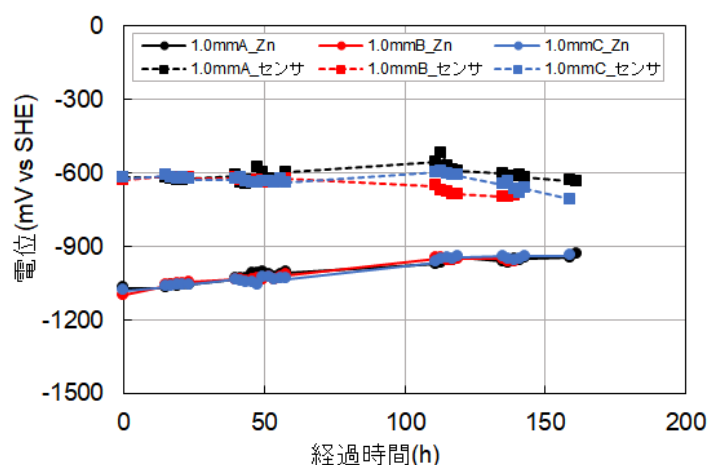


図 3-24 1mm ϕ 陽極亜鉛線と腐食センサの電位変化(ケース 1)

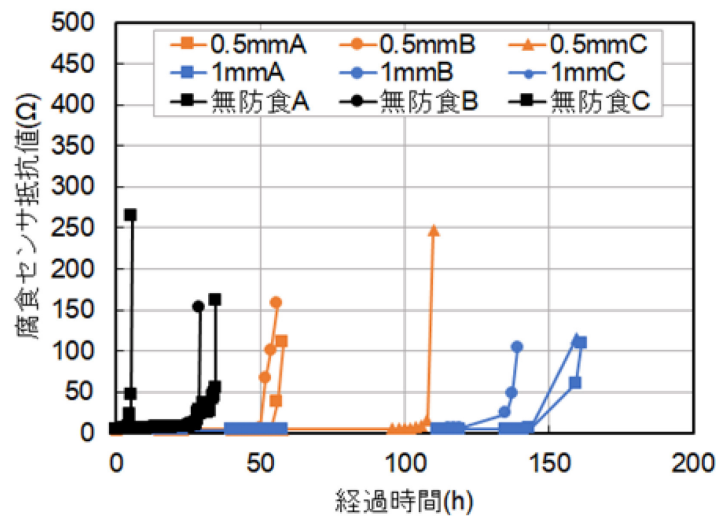


図 3-25 腐食センサの抵抗変化（ケース 1）

（４）実験結果（鉄箔センサの検知性能）

電流密度，電位変化，腐食センサの抵抗変化のそれぞれの計測結果の関係性について考察を実施した。

人工海水中において無防食の腐食センサは，凡そ 40 時間以内に腐食状態に至る。0.5mm ϕ の亜鉛線で防食した腐食センサは 50～100 時間で腐食を示しており，無防食の腐食センサの腐食検知時間を引くと，10～60 時間程度の防食効果となる。1mm ϕ の亜鉛線を用いた防食効果としては，90～120 時間の防食効果が得られたこととなる。それぞれの防食時間である 10～60 時間，90～120 時間の時点で電流密度と亜鉛の電位に着目すると，表 3-5 に示す結果となる。

電流密度で 85～130mA/m² 以下および亜鉛電位が初期値より 150mV 程度貴化したところが防食終了の時点と予想される。

表 3-5 防食終了と想定される時期の電流密度と電位

経過時間 (h)	0.5 mm ϕ		1 mm ϕ	
	電流 密度 (mA/m ²)	亜鉛 電位 (mV vs SHE)	電流 密度 (mA/m ²)	亜鉛 電位 (mV vs SHE)
10	110	1020	—	—
60	85	948	—	—
90	—	—	130	950
120	—	—	110	944

(5) コンクリート模擬溶液中における基本性能の確認（ケース 2）

前項の結果より亜鉛線を腐食センサに接続することで防食効果が得られた結果であったため、ケース 2 としてコンクリート模擬溶液を用いて防食効果の確認試験を行った。

試験環境は既報⁹⁾の内容に従い、図 3-26 に示すとおり、塩分濃度を 10% に調整した飽和水酸化カルシウム溶液(pH: 12.3)内にポンプで飽和水酸化カルシウム溶液を通じて二酸化炭素を除去した空気を混入させ、溶液に腐食センサ単体と 0.5mmφ、1mmφ の亜鉛線を接続した腐食センサをそれぞれ n=3 で浸漬した。

計測項目はケース 1 と同等の項目を計測し、陽極電位の変化と腐食センサの腐食判定時間に着目した。

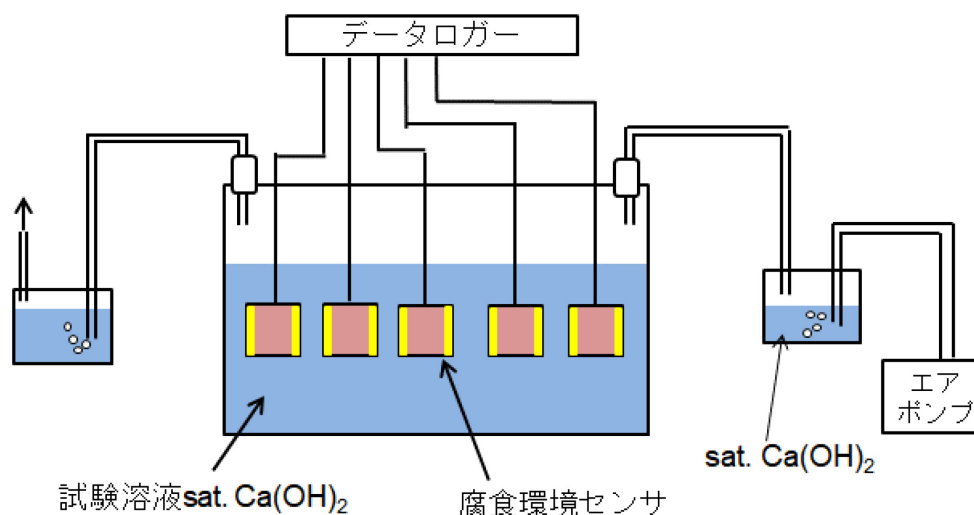


図 3-26 腐食促進試験の構成（ケース 2）

(6) 実験結果（亜鉛線の電位変化）

図 3-27 に 0.5mmφ、図 3-28 に 1mmφ の亜鉛線の電位変化を示す。

0.5mmφ の亜鉛線については、試験途中の 150 時間経過時点で亜鉛線の消費と水酸化カルシウムの固着に伴い亜鉛線自身が接続ケーブルから脱落し、その後は防食効果が極端に低下したと推察される。そのため電位は試験開始後から早期に貴化傾向となり、個体差のバラつきも大きい。ケース 1 と同様に、0.5mmφ の亜鉛線ではコンクリート模擬溶液中においても安定的に防食効果を得ることは困難と考えられる。

1mm ϕ の亜鉛線は試験期間中、継続的に安定した状態を保ち、人工海水中の試験結果と同様に緩やかに電位が貴化する傾向を示しているが、270 時間付近より B の亜鉛線のみ大きく貴化傾向を示した。この結果は、B の亜鉛線においては防食効果が低下傾向であることを示していると推察されるが、B のみが低下した理由としては個体差によるバラつきと考えられる。

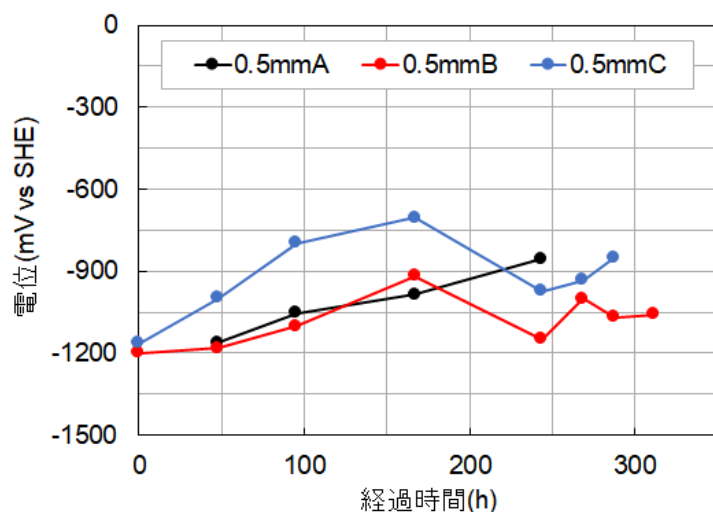


図 3-27 0.5mm ϕ 陽極亜鉛線と腐食センサの電位変化(ケース 2)

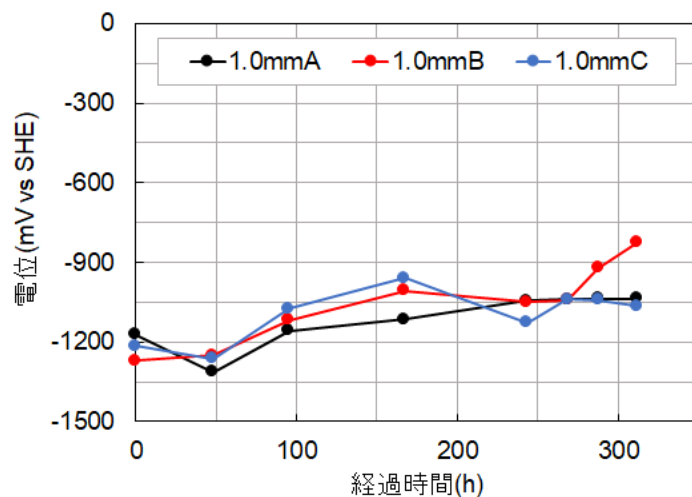


図 3-28 1mm ϕ 陽極亜鉛線と腐食センサの電位変化(ケース 2)

(7) 実験結果（腐食センサの抵抗変化）

図 3-29 に腐食センサの抵抗変化を示す。無防食と 0.5 mm の垂鉛線はほぼ同時期に腐食を判定している。0.5 mm の垂鉛線による防食水準は前述したとおり、途中で垂鉛線が脱落したため、防食効果が発揮されずに無防食と同時期に腐食を判定したと考えられる。無防食のセンサについては、約 300~350 時間で腐食に至り、ケース 1 の 10 倍程度の腐食判定時間が必要であったが、1mm ϕ の垂鉛線防食については、350 時間経過時点においても、表面的には腐食箇所が現れてきているものの、腐食を判定する抵抗値に至っておらず、防食効果が持続できているといえる。

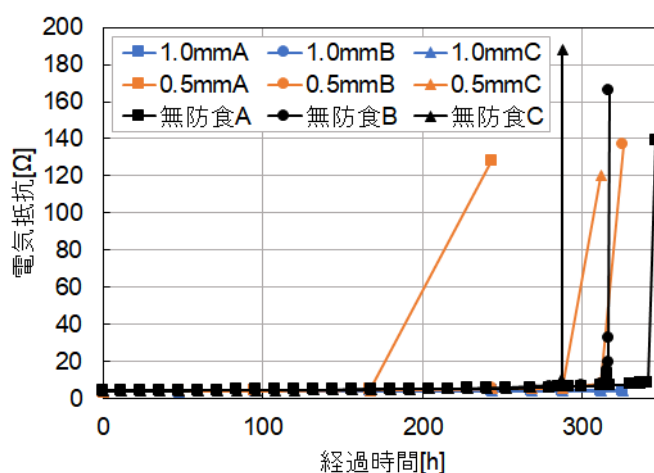


図 3-29 腐食センサの抵抗変化（ケース 2）

(8) 実験結果（復極量の計測結果）

0.5mm ϕ の垂鉛線においては安定的な防食効果を得ることができなかったため、1mm ϕ の垂鉛線におけるケース 1 およびケース 2 の復極量を評価した。図 3-30 にケース 1 の復極量の経時変化を、図 3-31 にケース 2 の復極量の経時変化を示す。なお比較のため、経過時間を合わせた。どちらのケースにおいても開始後から減少していき、陽極消費に伴う復極量の減少が確認された。また、鋼材の水素脆化が懸念される 1000mV を超過していないことも確認できた。

ケース 1 においては、120 時間経過後から急速に減少しており、前述した防食効果の低下時期とほぼ同時期であり、垂鉛電位の貴化に伴う防食電流の減少による復極量の減少が現れた結果となった。

ケース 2 についてはコンクリート中の防食基準である 100mV を超えた値を維持し続けていることがわかる。更に、完全防食の値である 850mV 付近を示した後、徐々に減少傾向を示した。また、270 時間付近から B の亜鉛線のみ復極量が減少しており、コンクリートの防食基準である 100mV 以下となった。この結果は、図-11 で示すとおり電位の貴化傾向を示した時期と同時期であり、防食効果の大幅な低下を示した結果と判断できる。一方、A、C については 350 時間を経過した時点でも、100mV 以上を維持できているが、全体的に減少傾向であることから防食効果は徐々に低下していると判断できる。

図 3-32 にケース 1 およびケース 2 における腐食センサの腐食判定後の表面状態と、同時期の 1mm ϕ の亜鉛線で防食したセンサ C の状態を示す。ケース 1 においては、腐食範囲が広くセンサ表面の全体に錆が発生している。一方、ケース 2 では、センサの一部が局所的に孔食し、その箇所の腐食が進行している。

環境条件から、どちらも孔食による腐食が進展して断線に至ると推察されるが、明らかにその状態は異なる結果であり、既往の知見¹⁴⁾より pH の違いによる腐食生成物の差異も考えられる。

1mm ϕ の亜鉛線で防食した腐食センサは、細かい孔食が確認されるものの、無防食のセンサより明らかに腐食箇所が少ない状態である。

(9) 実構造物への適用方法に対する今後の検討

実際の構造物に対して、流電陽極方式の電気防食を適用する場合、対象であるコンクリートの面積や鉄筋量、塩分濃度等の各種の条件と耐用年数によって犠牲陽極のサイズ・設置個数を設計することから、モニタリングセンサにおいても犠牲陽極の量を任意にコントロールできることが望ましいと考えられる。今回の試験で把握した防食電流値は、ケース 1 において最大 170 mA/m² であったため、10 年間の供用期間を想定したうえで、式 3-2 より必要陽極質量を計算すると、約 17g と算出される。亜鉛の比重である 7.149g/cm³ より 1mm の線材で犠牲陽極モニタリングセンサを構成する場合を想定すると、約 3m の亜鉛線材が必要となるため、現実的とは言えない。図 3-23 に示すとおり、実構造物に適用する腐食センサはセラミックスの筐体内部に設置され、2mm 厚のモルタル層をバックフィル材として亜鉛線より防食電流を供給する仕組みを想定しているため、適切な亜鉛線のサイズや形状、防食効果の耐用年数や設計供用期間に応じた調整方法等、今後の更なる検討が必要と考えられる。

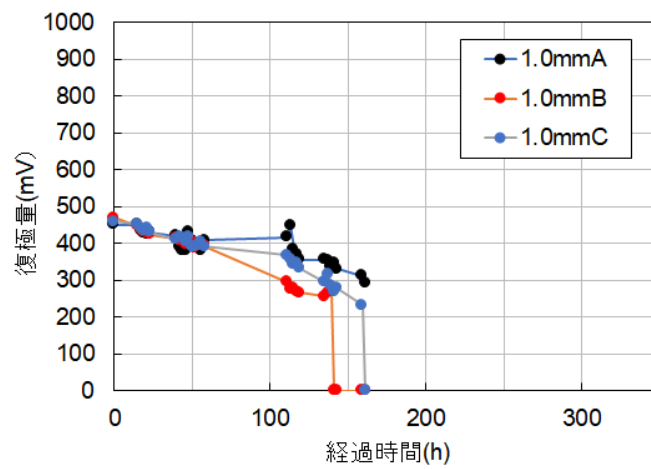


図 3-30 1mmφ 陽極亜鉛線を用いた防食時の復極量変化（ケース 1）

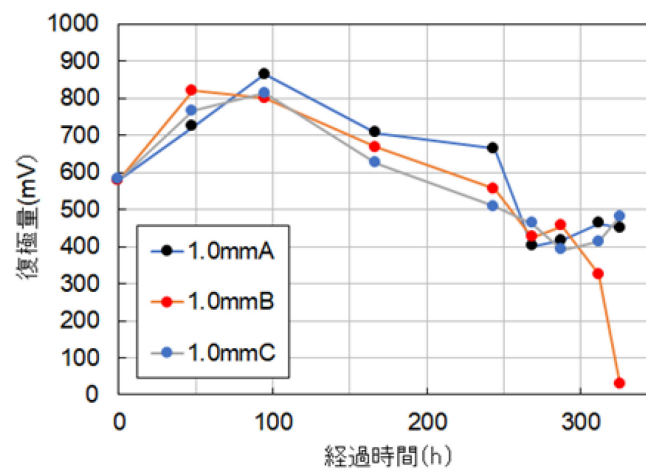
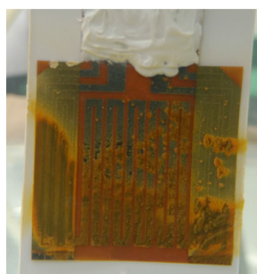


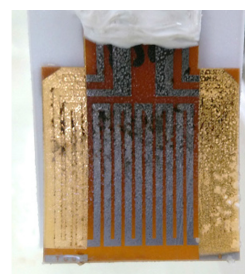
図 3-31 1mmφ 陽極亜鉛線を用いた防食時の復極量変化（ケース 2）



（ケース 1 無防食）



（ケース 2 無防食）



（ケース 2：1mm 防食 C）

図 3-32 試験後の腐食センサの状態

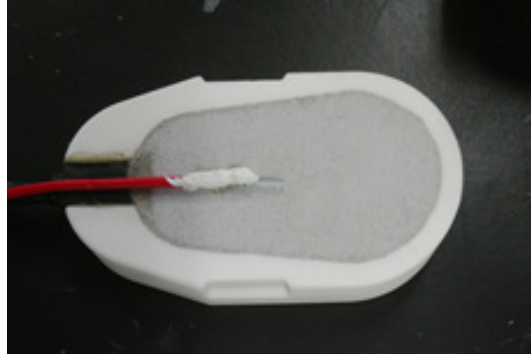


図 3-23 実際の腐食センサへ亜鉛線による犠牲陽極を設置した状態

(10) 犠牲陽極モニタリングへ適用性評価のまとめ

鉄筋の予防保全用腐食センサを犠牲陽極となる亜鉛線と接続し、その防食効果を確認するとともに、鉄箔センサが犠牲陽極のモニタリングセンサとして適用可能か基礎的な試験を実施した。その結果、得られた知見を以下に示す。

- (1) 腐食センサに 0.5mm ϕ と 1mm ϕ の亜鉛線を犠牲陽極として接続した場合、0.5mm ϕ は消耗が早く安定的な防食効果を維持できないため、1mm ϕ 以上の太さを有することが望ましい。
- (2) 1mm ϕ の亜鉛線を腐食センサの犠牲陽極に用いた場合、安定的に防食効果が得られ、人工海水中においては無防食センサの約 3 倍の防食効果が得られた。
- (3) コンクリート模擬溶液中における 1mm ϕ の亜鉛線による腐食センサの防食効果として、コンクリートの防食基準である復極量 100mV 以上を 300 時間程度維持した。
- (4) 実際の構造物に適用するためには、1mm ϕ 以上の太さを有する亜鉛線を用い、長さや本数を耐用年数や環境条件に応じて調整できることが望ましい。

3.5 鉄箔センサを活用した腐食面積の評価手法への活用

前項までの検討は鉄箔センサの断線現象から腐食の検知や、犠牲陽極のモニタリングへの適用性を検討した。いずれの検討も断線後はセンサとしての機能は消失してしまうが、鉄筋腐食には腐食の度合いによってグレードがあるように、腐食の進展を把握できることが維持管理上は望ましい。

本項では鉄箔センサの形状と回路構成を変更し、腐食面積の把握に適用性を検討した。

検討した腐食センサ（以下、本センサ）の外観を図 3-24 に、全体構造を図 3-25 示す。22mm ϕ の鉄箔を 0.1mm 厚のポリイミドフィルム上に接着し、ケミカルエッチングで網目状に形成し、腐食検知部とした。また、鉄箔接着面の裏面に金をスパッタリングで成膜した。

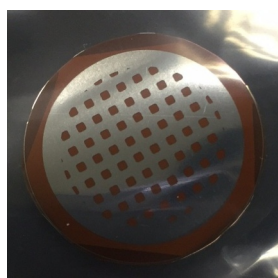


図 3-24 静電容量型腐食センサの外観

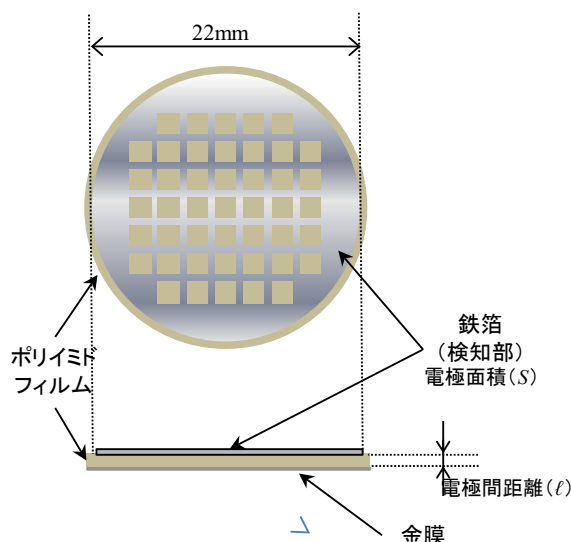


図 3-25 静電容量型腐食センサの構造

3.5.1 静電容量型腐食センサの測定原理

本センサは、腐食検知部である鉄箔部の腐食が進展することで欠損部が増大し検知部である鉄箔の面積が減少する。裏面の金膜は腐食しないため、鉄箔部の面積減少は対抗する電極面積の減少と等しくなる。すなわち、式 3-3 に示した静電容量は、鉄箔部の面積減少が電極面積 S の減少となり、腐食の進展に伴い低下していくと想定した。

$$C = \varepsilon \frac{S}{\ell} \quad \text{式3-3}$$

ここに、C：静電容量， ε ：誘電率，S：電極面積， ℓ ：電極間距離

この原理を確認することで、センサの腐食面積を直接計測することが可能となるため、腐食の進展度合いを定量的に把握することが可能と考えられる。

3.5.2 静電容量型腐食センサの性能評価

本センサの検知部である、鉄箔部の腐食による面積減少と静電容量の相関を確認するため、3%NaCl 水溶液に本センサを浸漬させ、7日を1サイクルとし1サイクル毎に腐食状態の目視観察を行い、腐食面積率と、静電容量の変化を計測した。静電容量の計測は、一旦、浸漬液からセンサを取出し、表面に付着した水分を取り除いた後、ピンセット状のプロブにて鉄箔端部と金膜間の静電容量を計測した。計測条件は、LCR メーターを用いて、100Hz~100kHz までの1Vの交流電界下にて実施した。また、健全なセンサとの比較を行うため、蒸留水に浸漬したセンサについても同様の条件で評価を実施した。

(1) 目視による腐食面積率の評価結果

本センサの変化を目視にて確認した腐食状態と、目視で判定した凡その腐食面積率を表3-6に示す。なお、目視の腐食判定方法は、腐食により鉄箔が欠損している箇所を腐食面積とした。結果、サイクルの経過に伴い、鉄箔部の腐食が進み腐食面積率が増加していくことが確認された。

また、蒸留水に浸漬して評価した結果を表3-7に示す。表面的に黒ずんでいる箇所は確認できるものの4サイクル後も欠損は確認されなかった。

表3-6 塩水浸漬を行ったセンサの状態と腐食面積率

括弧内数値は目視で評価した腐食面積率(%)




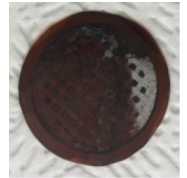
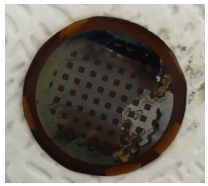
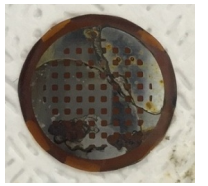
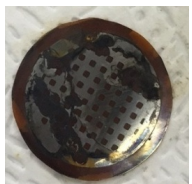

1サイクル	2サイクル
 (0)	 (20)
3サイクル	4サイクル
 (60)	 (80)

表3-7 蒸留水浸漬を行ったセンサの状態と腐食面積率

括弧内数値は目視で評価した腐食面積率(%)

1サイクル	2サイクル
 (0)	 (0)
3サイクル	4サイクル
 (0)	 (0)

3.5.3 センサの静電容量の計測結果

図 3-25 に 100kHz で計測した静電容量の結果を示す。塩水に浸漬したセンサの静電容量は、1 サイクル以降は除々に低下している。

図 3-25 の結果より、1 サイクル経過後の静電容量値を腐食面積率 0%の初期値として、表 3-6 の目視によって判定した腐食面積率と、静電容量の計測結果の関係を図 3-26 に実測値として示した。

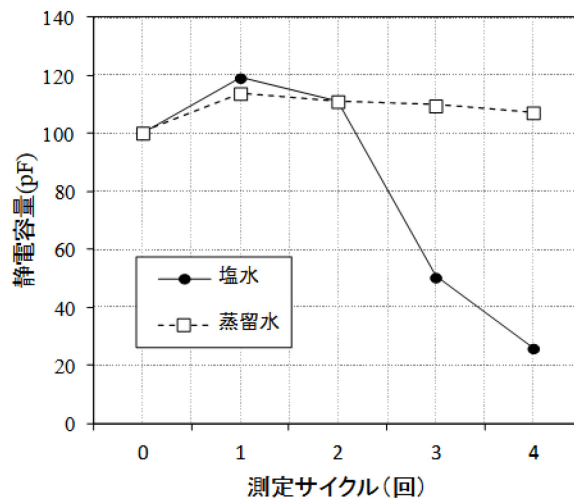


図 3-25 100kHz 交流電界下における静電容量の変化

更に、1 サイクル経過後の静電容量値を初期値として腐食面積率が理論的に上昇した際に、減少する静電容量を理論値として実線で示した。

この結果より、本センサの静電容量の計測値は、理論的な腐食面積率と静電容量の関係によく近似しており、特に 60%以上の腐食面積率は、静電容量の計測によって精度よく把握できると考えられる。

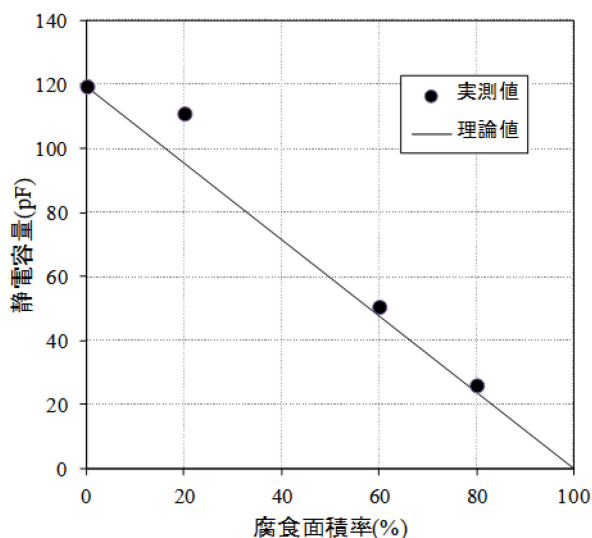


図 3-26 本センサの静電容量と腐食面積率の関係

3.6 第 3 章のまとめ

既往の腐食センサや従来の手法について整理された課題を解決するべく、鉄箔を用いた腐食センサの実用化を検討した。既往の報告にある線状のセンサに比べ鉄箔センサの検知性能が、腐食による破断を電気抵抗で捉えやすいことをシミュレーションして確認したうえで、腐食判定基準の電気抵抗値を決定し、実際のセンサを用いた性能試験を実施した。基本的な性能確認はコンクリート模擬溶液内にて塩分濃度を変化させて破断に至る塩分濃度とともに腐食速度を評価した。また、モルタルおよびコンクリート試験体においてもセンサを埋設して性能確認を実施した。それぞれ、センサ設置位置と同位置に鉄筋は配し、従来手法である自然電位法との腐食検知時期の比較を実施した。更に、センサを実用化するための施工性を考慮してセンサを保護する外装構成についても具体的に検討を行い、高強度なセラミックス製の筐体と表面保護用のモルタルで構成することとした。

また、鉄箔センサは様々な応用が可能であるため、流電陽極方式の電気防食に用いられる犠牲陽極のモニタリングセンサとしての可能性について、亜鉛線

を犠牲陽極とした際の性能をコンクリート模擬溶液内で確認を行った。加えて、腐食による鉄箔の欠損面積を静電容量値の変化から把握する静電容量型腐食面積センサについても基本的な性能を確認し、様々な応用が期待できることを示した。以下に要点をまとめる。

- 1) 鉄箔センサを開発し、腐食により破断する際の判断基準を二つの腐食モデルからシミュレーションし、凡そ 100Ω 以上で検知した場合を、腐食として評価できるとした。しても構わない。
- 2) 鉄箔腐食環境センサは塩化物イオン濃度 500ppm の環境にて腐食による破断が生じ、塩化物イオン濃度が増加するほど破断時間は短時間になる。この結果は李らの検討したセンサの感度である 0.1%Cl 濃度の 1/2 の 0.05% で検知できる非常に高い感度を有するセンサを提案できた。
- 3) 鉄箔センサの検知性能が高い感度を実現できた理由として、均一な鉄箔を用いていること、アノード電極として作用する金膜がセンサ端部に蒸着されていることから、腐食が発生した際に電池効果によりアノード分極電流が鉄箔に流れ込み、急速にセンサの破断に至るためだと推察している。
- 4) 腐食環境センサが破断する塩化物イオン濃度 500ppm の環境は、腐食速度 0.001mm/y mm/y であり、腐食環境センサが塩化物イオンに対して高感度に反応する性能を有している。
- 5) コンクリートに埋設した鉄箔センサの腐食検知開始時期および全数検知時期に対応した Cl 量は、かぶり 25mm で開始時 1kg/m^3 ～全数検知時 4.5kg/m^3 、かぶり 40mm で開始時 0.5kg/m^3 ～全数検知時 1.5kg/m^3 程度であった。この結果は、一般的に言われている、塩化物イオンの発錆限界濃度である 1.2kg/m^3 と近しく、コンクリート内においても適切な検知性能を発揮する。
- 6) 鉄箔センサの応用事例として、流電陽極方式の電気防食工法に用いる犠牲陽極の消費状況をモニタリングすることの可能性が確認された。
- 7) 新しい形状と回路設計を鉄箔センサに施すことで、腐食して欠損する面積を静電容量から計測する手法にも使用できる可能性を確認した。

第3章の参考文献

- 1) 武若耕司, 山本 悟: コンクリート中の塩化物浸透過程非破壊モニタリングシステムの開発研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.1, pp.1183-1188, 2001
- 2) 李翰承, 申成雨, RC 構造物における鉄筋腐食の劣化原因のモニタリング用腐食 センサーの開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, 2002
- 3) Lee H S., Shin S.W., Ahn J M. and Kim Y C., Development of corrosion sensors for monitoring steel-corroding agents in reinforced concrete structures, Materials and Corrosion, Vol.54, No.4, 229-234, 2003
- 4) ASTM C876-15 (2015): Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete
- 5) CEB Working Party V/4.1: Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures Affected by Reinforcement Corrosion (draft4) BBRI-CSTC-WTCB, Dec.1997.
- 6) 露口雄次, 町田篤彦, 直流比抵抗法を用いたコンクリート構造物の内部推定に関する基礎的研究, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 5-590, p.1179 - 1180, 2005.
- 7) 田中慎吾, 上田隆雄, 加川哲也, 七澤章, フライアッシュを混和したコンクリート中の鉄筋腐食モニタリングに関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 1, pp. 1371-1376, 2007
- 8) D. A. Hausmann. (1967), Materials Protection, Vol. 6, No. 11, 19-23
- 9) 加納伸人, 望月紀保, 篠田吉央, 千葉丈夫: 流電陽極方式によるコンクリート中の鉄筋の防食, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.517-522, 1988
- 10) 牛島栄, 酒井芳文, 杉本正威, 鈴木光夫: 金属溶射被膜による鉄筋の電気防食効果の検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.797-802, 1992
- 11) 土木学会: 電気防食工法設計施工指針(案), コンクリートライブラリー 107, 2001.11
- 12) 一般社団法人 軽金属溶接協会: アルミニウム合金製船殻工作標準, LWS W 8101, 2019
- 13) 大谷俊介, 板屋隼人, 若林徹, 江里口玲, 早野博幸, 他, : コンクリート模擬環境での腐食環境センサの性能評価, 土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会, V-187, 2019.9

- 14) 高谷哲, 西沢彩, 中村士郎, 山本貴士, 宮川豊章: コンクリート中における鉄筋の腐食生成物の生成プロセスおよび電気化学的特性, 土木学会論文集 E2, Vol.71, No.3, pp.235-247, 2015

第4章 センサインターフェースを有する RFID を活用した診断技術

4.1 RFID の種類と活用方法

RFID とは、Radio frequency Identification の略語で日本では JIS X 0500-3 で国際規格として ISO/IEC 19762-1 に定義され、日本国内では IC タグという和製英語でも呼ばれている。RFID は、バーコードや QR コードと同じく個体認識技術の一つであり、それらに関わるデバイスや技術全体を総称している。各種の RFID タグとリーダーライタの外観を図 4-1 にシステム構成を図 4-2 に示す。

バーコードも赤外線を使った無線認識技術といえるが、RFID は電磁波、電波による無線通信を特長としている。バーコードは赤外線により情報を読み取るため、リーダーとバーコード間で物理的に赤外線を遮断するものが存在すると読み取ることができなくなるが、RFID はリーダーライタと RFID の間に物理的な遮蔽物が存在しても、電磁波や電波を透過する物質であれば通信を確立することができる。また、ほとんどのバーコードについては、複数を一括して読むことは困難なため、個々に読み取る必要があるが、RFID では、複数を一括して読み取ることが可能である。更に RFID には書き換え可能な固有のメモリ（記憶領域）を有するものが大半であり、情報を記録できることも大きな特長である。そのため、バーコードでは記録できない多くの情報を書き込むことや、情報の変更が可能となる。耐久性面においては、RFID は汚れ等で、通信性能が劣化することはないが、バーコードでは汚れることや、表面に落書きをされると読み取れなくなるが RFID では表面の汚れによる通信性能への影響が極めて少ない。

これら、RFID は多くの特長を有しているが、バーコードに比べてコストが高いという欠点がある。これはバーコードのように印刷して生成できるのではなく、半導体部品である IC チップを内蔵しているためであり、コスト面の課題が普及の足かせともいえる。



図 4-1 各種 RFID タグとリーダーライタ



図 4-2 RFID と制御システムの構成

RFID には表 4-2 に示すとおり、アクティブタイプとパッシブタイプに大別され、アクティブタイプは RFID チップの電源を電池から供給し、RFID チップから電磁波を発信するタイプでパッシブタイプはリーダライタから受信する電磁波により RFID チップの起電力を確保する。アクティブタイプは一般的な無線デバイスと同様な動きを行えるが、パッシブタイプはリーダライタから電磁波を受信しなければ動作しないため、一般的な無線デバイスと異なり RFID 特有の無線通信方式といえる。電子マネーや無人レジ等で用いられる多くの RFID は、電池レスで安価なコストであるパッシブタイプの RFID が利用されている。

また、日本国内で RFID に利用される無線周波数は、表 4-2 に示すとおり 4 種類に大別されている。それぞれの周波数帯で通信距離や電波障害等に特徴があり、利用目的や設置物によって選定されている。

表 4-2 パッシブタイプとアクティブタイプの RFID の違い

種類	バッテリー	通信距離	特長
パッシブタイプ	無	短	サイズが抑えられ、メンテナンスが不要。 商品管理や電子マネーなどで活用されている。
アクティブタイプ	有	長	帯域により数 10m の長距離通信が可能。大規模な倉庫における、人や資材の所在識別に有用

表 4-2 パッシブタイプ RFID の周波数帯別の特徴

	135KHz以下	13.56MHz (HF帯)	920～950MHz (UHF帯)	2.45GHz
伝送方式	電磁誘導方式	電磁誘導方式	電波方式	電波方式
通信距離	～50mm	～200mm	～5000mm	～1000mm
水分影響	小さい	比較的小さい	やや大きい	大きい
金属影響	比較的小さい	大きい	大きい	大きい
備 考		免許・登録不要	250mW以下登録不要 1W：登録要	

4.1.1 RFID の活用事例

パッシブタイプの RFID の代表的な活用事例としては交通系 IC と総称される電子マネーや、無人レジ用のタグ等がある。交通系 IC の代表的な Suica®は発行枚数が 2 億枚を超えているとされており、国内では全人口以上に普及しているデバイスといえる。

交通系 IC カードのシステム構成で説明すると、RFID タグが交通系 IC カードであり、リーダーライタが自動改札機となる。また、最近のスマートフォンには RFID 規格のひとつである NFC（Near field communication）に対応した IC チップと NFC リーダーライタが内蔵されており、IC カードとリーダーライタ両方の機能を備えている。

最近の RFID 潮流である無人レジへの展開は、ファーストリテイリング社のユニクロや GU での適用事例である。これは図 4-3 に示すように、衣類に付属される商品タグに RFID が内蔵されており、個体識別情報として商品情報や価格と紐づけされている。買い物かごに入れた衣類をレジに設置されたリーダーライタで読み取ることで瞬時に衣類の種類、サイズ、価格等を判別し精算金額を算出する。この仕組みにより、リアルタイムに在庫の変動を把握することも可能となり、都度行うべき棚卸の必要性も生じない。また、レジ係の人員を削減できる大きなメリットがある。

経済産業省は 2017 年 4 月 18 日、2025 年までにコンビニエンスストアの全取扱商品に RFID タグを取付けて活用する方針を掲げており、一部の店舗で活用する実証実験が始まっている。このように今後も普及と活用が拡大するものと予想される。

2000 年代初頭より、建設分野においても RFID の活用を検討する事例が増加し、一部は実際の現場において活用されている。表 4-3 に既往の報告¹⁾で整理さ

れた建設分野における RFID の適用例を示すとおり、施工～維持管理において様々な検討が行われている。中でも表内に緑で網掛けした事例は実際の現場で適用した実用化事例といえる。現時点においても利用が継続されているか不明な事例があるものの、ミキサー車配車システムについては、大手生コンクリート工場で現在も運用されている。

表 4-3 建設分野における RFID 技術の活用事例 ¹⁾

分野	事例名	段階	実施団体	概要
施工	テストピース管理システム	実証実験	民間企業	施工時に打つコンクリートのテストピースに IC タグを入れ、テストピースの正当性と管理を効率化し、強度試験を行う。
	現場作業員管理システム	実用化	民間企業	ヘルメットに付けた IC タグを利用し、現場の入退場を管理することにより、労務管理を効率的に行う。
	ミキサー車配車システム	実用化	民間企業	ミキサー車にカード型 IC タグを搭載し、動きを追尾する。複数の工場の配車を統合し、物流管理業務（配車）の効率化が可能。
	コンクリートの養生管理	実証実験	米国建設業界団体	養生中のコンクリート構造物に温度センサー付き IC タグ（セミアクティブ）を埋め込み、コンクリートの強度発現を管理する。
	部材の搬入管理	実証実験	米国建設業界団体	部材に IC タグを取り付け、トラックに載せた状態でリーダーで情報を読み取り、部材の搬入管理を効率的に行う。
	鋼材管理システム	実用化	民間企業	鋼材に IC タグを付けることにより、鋼材の受け入れ、在庫管理、加工、出荷等の作業を効率的に行う。
	バッテリーロコ運行管理システム	実用化	民間企業	バッテリーロコのレールに IC タグを設置し、ロコのリーダーにより位置や走行方向を把握・表示。
	工事用工具の管理	実証実験	米国建設業界団体	工事用工具に IC タグを付け、工具の受け渡しの管理、工具箱のリーダーにより工具の追跡を実施する。
維持管理	埋設物の位置確認	実証実験	国土交通省等	埋設物に取り付けた IC タグを探査機（リーダー）で読み取ることで、埋設物の位置を特定する。
	埋設物情報管理	実証実験	国土交通省	埋設物などの都市施設設備に IC タグを取り付け、点検などの業務を効率的に行う。
	ダム点検情報支援システム	実用化	内閣府	点検の際、設備に貼り付けられた IC タグのデータを携帯端末 PDA から読み取り、新しいデータ等を書き込み、点検を支援。
	法面での岩・地滑り検出	実証実験	国土交通省等	のり面に取り付けたナノプロセス（IC タグ）により、地滑りの状況を随時管理することができる。
	道路設備維持管理支援	実証実験	民間企業	照明灯、標識などの道路設備に IC タグを設置し、情報を読み取り、点検履歴を現場で確認、更新。
	車両の旅行速度の測定	実証実験	米国高速道路管理者	車搭載の通行料金支払いのための IC タグの ID 番号を一定間隔の路側のリーダーで読み込み、車の平均旅行速度を計算する。
	鉄道構造物管理	計画中	鉄道総合研究所	鉄道構造物に高度なセンサーを設置し、これらのデータを IC タグに蓄積する。タグを光ファイバーでつなぎ管理拠点への集積も考慮。



図 4-3 衣料品に取り付けられている RFID タグ

4.1.2 センサインターフェースを有する RFID

通常，バーコードや QR コードと同じ目的で個体識別技術として使われる RFID であるが，センサネットワークや IoT(Internet of Things)へのニーズの高まりからセンサ機能を複合した RFID 用 IC チップも開発が進んでいる。これらの多くは，センサにサーミスタや MEMS センサといった，一般的なアナログ式センサより極めて省電力で動作するものがほとんどである。更には，RFID チップと半導体製造装置で一体化して製造されているものも多く，計測精度や温度特性を考慮すると構造物のモニタリングには，適用が困難である。

本研究では，RFID チップに外部からアナログセンサを接続できるセンサインターフェースを有するものの適用を検討した。RFID チップ内の構成とセンサとの接続に関する回路ブロックを図 4-4 に示す。

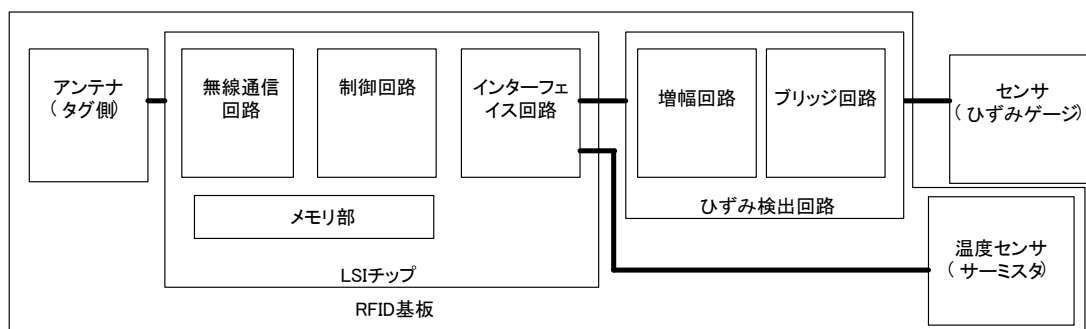


図 4-4 センサインターフェース付き RFID のブロック図

センサインターフェース付き RFID を適用したデバイスは，研究レベルではいくつか見られるものの，実用化されたデバイスは極めて少なく，SRI International 社がスペースシャトルの耐熱タイルの点検に温度ヒューズを接続

して使用したという情報²⁾がある。

研究レベルでは国内で東京大学が、RFID の IC チップを 2 個使用し、1 個は電磁波を受けてセンサを動作させるもの、もう一つが送受信を行うものといったデバイスを提案している³⁾。2015 年以降は海外の半導体メーカーがセンサインターフェース付き RFID チップをいくつか製品化しているが、どれも測定精度が低く有線センサと同じレベルの計測が可能なレベルまでは至っていない。

コンクリート構造物のモニタリングを対象とした具体的な検討については、研究レベルとして海外を中心にひび割れや、鉄筋腐食、温度を対象とした各種の検討^{4),5),6)}が見られるものの、実用的なレベルのシステム構築まで行った事例はほとんど見られない。コンクリート分野における、センサインターフェース付きパッシブ RFID を使ったデバイスとしては小川らが提案した、グラウト充填検知システムが世界で初めて実用化したシステムといえる。

4.2 グラウト充填検知システムの検討

1985 年に英国の Ynys-y-Gwas 橋が、PC グラウト充填不足、凍結防止剤の塩分などによる PC 鋼材の腐食破断が原因で、前触れもなく落橋しており、当時の英国運輸省の見解では、本橋以外にもかなり PC 鋼材の腐食が発見されたことから、1992 年から 1996 年まで PC グラウト充填を行うポストテンション方式が禁止された経緯がある。国内においても長野県木祖村（村道）に位置する新菅橋が、1989 年に支間中央部分より桁が折れ、さらに両岸より 7 m 付近のプレキャストセグメント継目部で桁が破断し落橋している。

このような状況を踏まえ、グラウトの充填状態を把握する手法が各種検討されており、加えて施工時にグラウトが適切に充填されたか等、施工品質の確保の面においても検知手法のニーズは高い。グラウト充填検知については、一般的には、充填したグラウト量を把握することで、施工時のグラウト充填を確認することや、熱線式センサを用いた施工時の充填度合いを確認する手法が存在するが、小川らはセンサインターフェース付き RFID を活用したグラウト充填検知システムを検討した⁷⁾。

本手法は、グラウトを充填するシース管の一部に開口部を設け、センサを設置し RFID を通じてセンサのインピーダンスを計測するものである。ここで適用したセンサは金属薄で二点の電極性状のものであり、グラウトの充填前であれば電極間は絶縁状態であり、高いインピーダンス状態を示す。グラウトが注入された際は、固まる前であればグラウトの水分によりインピーダンスが急激に低下する現象を捉えるものである。グラウトが硬化するに従って、水分が減少していくことからセンサのインピーダンスに応じて硬化状態を段階的に把握できるものとしている。

センサインターフェース付き RFID を通信インターフェースとして適用することで電池レスの計測が実現できることや配線が不要となる点が挙げられる。また、施工時の計測により施工状態の管理に適用できるだけでなく、供用後も簡単に計測できることから、将来的な維持管理を行う上で、グラウトの充填状態をいつでも、だれもが確認できるようになる点が挙げられている。

4.2.1 センサとの接続による課題解決と実用化

センサインターフェースを有するパッシブ RFID とセンサを接続したデバイスを実用化することにより、図 4-5 に示すとおり、第 2 章で抽出したセンサ技術の実用化に対する課題を解決できる可能性が高い。



図 4-5 センサ技術の課題解決手法

特筆すべきポイントとして、バッテリーを必要とせず、電磁波および電波で電源を供給できることで、無線計測が可能な点で、センサケーブルが露出しないことから、耐久性の懸念点が大幅に解消される。

4.2.2 RFID 基板の保護

RFID を搭載する電子基板をコンクリート内部に埋設するためには、何らかの外装が必要である。コンクリートのアルカリ性に耐えうる素材でなければ維持管理を行う上で長期の供用あり、一定以上の強度を保有してなければ構造物に悪影響を及ぼす可能性がある。

また、簡便な作業で取り付けが可能であることや、取り付け後にアンテナの向きがコンクリート表面に平行に固定される必要がある。そこで、基板の保護と簡便な作業性を目的に RFID 専用の外装ケースを検討した。図 4-6 は、RFID 基板を外装する構成である。

このケースは配筋された鉄筋交差部に三点で固定することでコンクリート表面に平行に強固に設置できる。

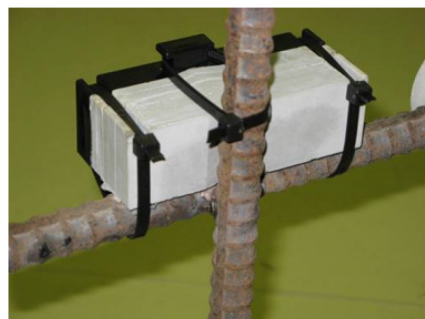
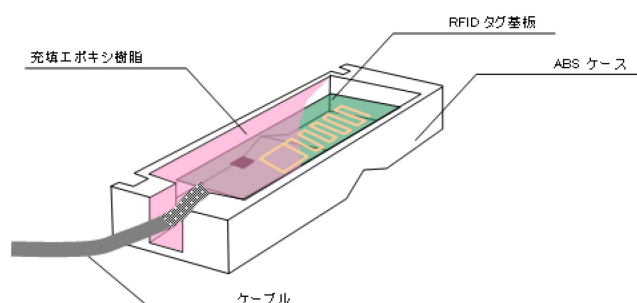


図 4-6 RFID 基板を保護する外装ケースの構造と鉄筋交差部への取り付け方法

4.2.3 センサと接続した RFID システムの使用方法

センサと接続できるインターフェースを有する RFID のメリットとはコンクリート構造物内部に埋設を行う。システムの概要イメージを図 4.2.2.1 に示す。リーダーライターから発信される電磁波や電波を RFID チップが受信し、整流（電波の場合）または共振（磁界の場合）により、RF タグのアンテナに電力が発生する。発生した電力により、制御回路、メモリを動作させ、その際に接続したセンサへの電力供給を行い、RFID 内のデータや計測したセンサ値を、電波または磁界に乗せて RFID のアンテナから返信することとなる。

リーダーライターのアンテナで、受信した RFID からの電波や磁界を受信、制御部で、電波または磁界から情報を取り出すといった図 4-7 に示すようなシステムイメージである。



図 4-7 RFID タグとセンサを接続するイメージ

RFID と計測部であるセンサはケーブルで接続されケーブルも埋設する。

通信部と計測部を別の場所に設置することで、高所や手の届かない位置の計測を簡便に計測できるシステムとしている。また接続されるケーブルやコネクタについてもすべてコンクリート内部に埋設されるため、紫外線による劣化やコネクタの腐食による耐久性低下の懸念が生じない。

実際の適用イメージを図 4-8 に示す。埋設された RFID タグにはバッテリーを搭載していないため、電池交換の必要もなく、基板に搭載された IC チップをはじめとする半導体部品が故障しなければ、永続的に計測可能となる。

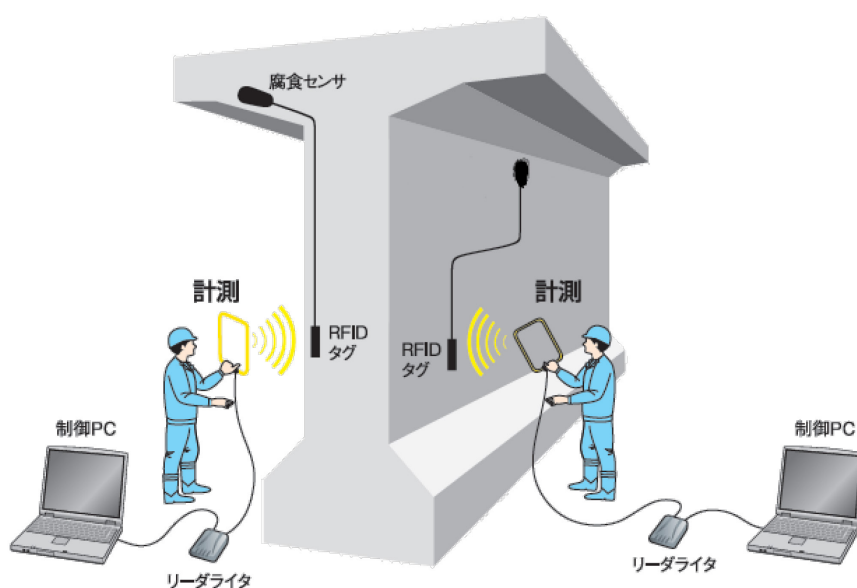


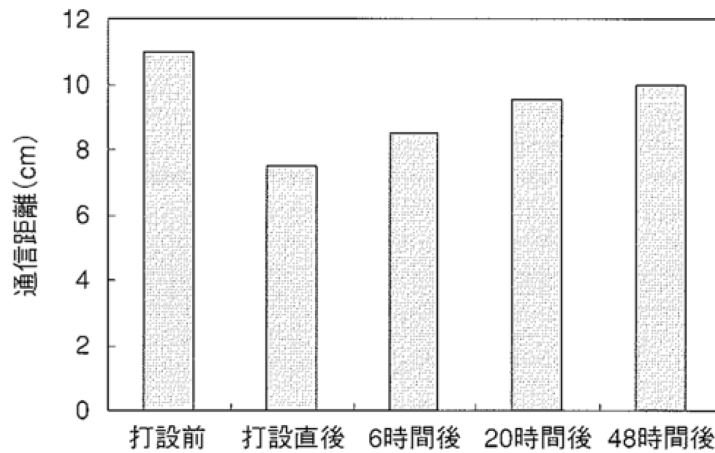
図 4-8 センサと RFID を接続したシステムのコンクリートへの適用イメージ

4.2.4 コンクリートに埋設した際の通信特性

コンクリートに RFID を埋設した場合、各々の RFID が揺っている仕様環境である自由空間とは異なり、通信距離が減衰する可能性がある。通信距離に影響する主な要因として金属と水分がある。金属は鉄筋や PC 鋼材といった内部に配置されるものであり、RFID と金属が近づくことで、RFID が通信するための共振周波数が変化してしまうことから、一定の通信周波数で送受信するリーダーライタが受信しにくくなるためである。

また、にコンクリートは打込み時には水分を多量に含んでいるが、材齢が進むごとにセメントと水の水和硬化が進み水分量は減少する。また、多くのコンクリート構造物は屋外で供用されることが多く、雨水の侵入も想定される。

これらの通信障害要因については、既往のいくつかの研究があり、具体的な研究がなされている。



コンクリートの材齢と RFID の通信距離の変化の関係

図 4-9 コンクリートに RFID タグを埋設した際の通信距離の変化

4.3 各種センサを接続するための検討

4.3.1 センサインターフェース付 RFID の温度特性

センサを接続する RFID 用 IC チップや周辺回路が温度特性を有する場合、それらが計測値に大きく影響を及ぼし、正確な値を計測できない。従って、温度特性によって出力データを補正する必要がある。そこで、個々のばらつきも含め RFID を搭載した基板の温度特性を把握した。

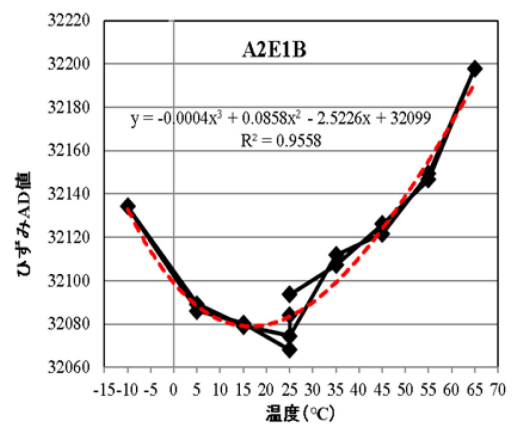


図 4-10 温度特性（変動なし）

図 4-11 温度特性（変動あり）

パッシブ RFID にひずみセンサを接続した際の出力値の温度特性を図 4-10 および 4-11 に示す。左は比較的溫度に対してリニアに変化しているので一次方程

式でも補正可能であるが、右のような特性では三次方程式で計算しなければ正しい値を得ることができない。

このように個々の特性が異なることから、予め品質試験で把握した温度特性から温度補正値を導き出して、RFID のメモリに温度補正値を記録，ソフトウェアで計測した温度とセンサデジタル値から温度補正計算を行い，計測値を表示することとしている。

$$\beta = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad \dots \text{式 4-1}$$

$$R = (\text{腐食AD値} - \beta' - \text{基準腐食AD値}) / \gamma \quad \dots \text{式 4-2}$$

$$\varepsilon = \alpha \times (\text{ひずみAD値} - \beta' - \text{基準ひずみAD値}) \quad \dots \text{式 4-3}$$

R：腐食抵抗値

γ ：抵抗特性値（抵抗値と腐食 AD 値の関係から算出される傾き）。概ね 9 程度，

β' ：25°C基準の補正値

$$\beta' = (ax^3 + bx^2 + cx) - (a \llbracket \times 25 \rrbracket^3 + b \llbracket \times 25 \rrbracket^2 + c \times 25)$$

α ：ひずみセンサ傾き係数（引張校正試験により算出）。標準型センサで概ね 0.15 程度，

基準腐食（ひずみ）AD 値：25°Cでの腐食 AD 値および無載荷ひずみ AD 値

計測から温度補正値の流れは図 4-12 に示すとおりで，RFID タグが保有するメモリに個々の温度補正値を記録させてセンサの計測したアナログ値の A/D 変換後のデジタル値からメモリに記録された補正値を読み出して算出する。

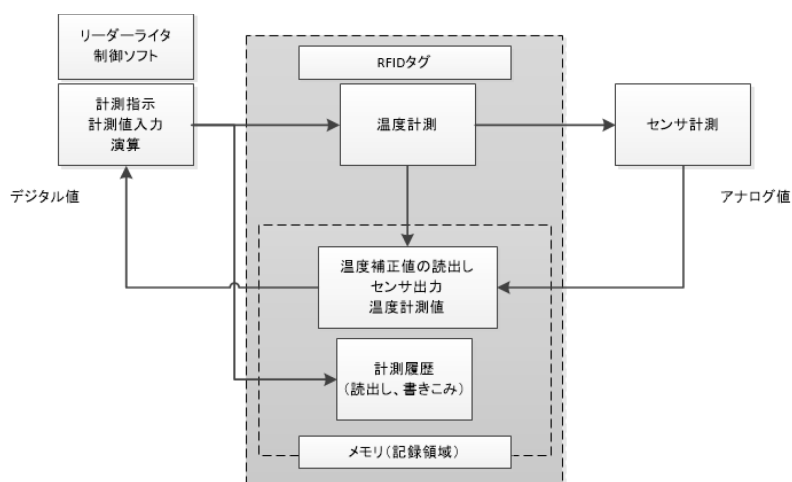


図 4-12 A/D 変換と温度補正のフロー

4.4 RFID ひずみ計測システムの開発

4.4.1 コンクリート構造物におけるひずみ計測手法の課題

コンクリートの施工から供用、維持管理において「ひずみ」を計測するニーズは多くある。施工中においては、コンクリートの硬化収縮ひずみや水和熱に起因する温度応力ひずみ、供用中においては、クリープひずみや乾燥収縮ひずみ、維持管理においては、外的荷重によるひずみや、鉄筋腐食や ASR による各種の膨張ひずみ等、ひずみを計測することで、コンクリートの様々な挙動を把握できる。

ひずみを計測する手法として、最近では光ファイバセンサや画像相関法といった手法があるが、古くから直接的かつ安価な方法として、多くのケースでひずみゲージとデータロガーが活用されている。ひずみゲージはサイズが小さく安価で使いやすい一方、接着して使う事や、データロガーで出力を増幅して計測する必要があることから、設置作業や計測作業は簡便とはいえない。また、多量のひずみゲージを用いる場合、ケーブルが煩雑になりやすく、作業工数が増加する。さらには構造物の維持管理を目的に長期間使用する場合には、ケーブルが構造物から露出するためケーブルの耐久性が大きな課題となる。

画像相関法は、撮影したデジタル画像を変化前後で比較する手法であり、ひずみゲージのようにミクロなひずみを計測するのではなく、面的なひずみの挙動を簡便に把握できるという大きなメリットがあるものの、デジタル画像を撮影方法や解析方法に一定のノウハウが求められる。加えて、デジタル画像を得ることから構造物表面で変化するひずみしか計測できない。

近年、光ファイバを活用したひずみ計測の検討が進められている。光ファイバは、電気信号を利用しないことや 1 本で多点計測が可能なことから、構造物の全体挙動を計測する手法や構造物内部に埋設してプレストレス応力挙動を把握する手法が提案されている。ただし、光ファイバ計測は計測器が高コストなことや、光ファイバ自身がガラス素材であることから、設置作業時に慎重な取り扱いが求められる等の課題がある。

4.4.2 RFID ひずみ計測システムの概要

RFID ひずみセンサの外観を図 4-13 に示す。RFID ひずみセンサは、ひずみセンサ部と RFID タグで構成されている。ひずみセンサ部は D10 × L700mm の異形鉄筋であり、その中心部のひずみを検知する。RFID タグは ABS 樹脂のケース内に RFID チップを中心とした計測回路と温度計測用のセンサを内蔵し、エポキシ系樹脂で封止している。計測部は一般的に用いられるひずみゲージでは消費電力が大きいいため、消費電力を 1/3 以下で動作する高インピーダンスの専用ひずみゲージを用いた。また、曲げ応力の影響を受けないように 4 アクティ

ブゲージ方式で鉄筋中央部に貼付している。

また、通信部に用いたセンサインターフェース付き RFID は、温度センサを内蔵しており、ひずみの計測と同時に温度計測を行う仕様で設計した。

内蔵温度センサで計測する温度は、計測したひずみ値を熱膨張で生じるひずみと分離して解析することや、RFID の基板に搭載する電子部品の個々の温度特性を補正することに用いられる。



図 4-13 RFID ひずみセンサの外観
(左：鉄筋計タイプ、右：コンクリートひずみ計タイプ)

4.4.3 RFID ひずみ計測システムの制御ソフトウェア

RFID ひずみ計測システムのソフトウェア画面を図 4-14 に示す。ひずみセンサの出力電圧は RFID の IC チップで A/D 変換され、RFID の IC チップに搭載された温度センサのデジタル値とともにリーダーライタに送信される。リーダーライタから受信したデジタル値を 4.3 項に示した変換式を用いてひずみ値として表示させるのが、専用ソフトウェアである。

なお、専用ソフトウェアでは、ダイレクトにひずみ値を表示するとともに、RFID の IC チップ内のサーミスタで計測した温度も表示することから、温度差で生じる熱膨張ひずみとの分別が容易に可能である。また、図 4-15 に示すとおり、RFID のメモリに計測結果を任意に記録する機能を備えており、計測履歴を 6 回分記録することが可能である。ひずみは変化量として評価する指標であるため、記録した計測履歴から、前回の計測結果を確認・比較できる機能は、維持管理を行う上でも非常に有効な機能といえる。

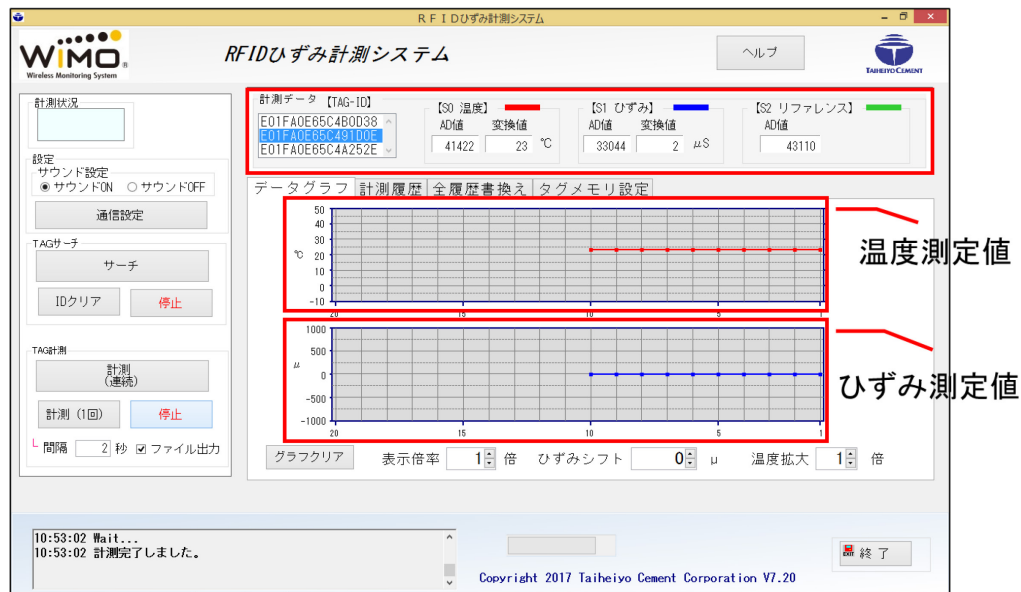


図 4-14 RFID ひずみ計測システムのソフトウェア (計測画面)



図 4-15 RFID ひずみ計測システムのソフトウェア (計測履歴画面)

4.4.4 RFID ひずみ計測システムの性能

従来のひずみゲージのようにアナログの電位変化を計測する手法と異なり、RFID ひずみ計測システムはアナログーデジタル変換を行い、デジタル値として出力を行うこととなる。すなわち、A/D 変換の分解能が直接、ひずみ計測精度

に影響を及ぼす。A/D 変換の分解能とは、RFID チップの保有する AD コンバータにおいて、測定対象となる電圧をどの程度細かく検出できるかを示す能力であり、重要なパラメータである。通常、分解能を表現する単位としてはビット (bit) を用いる。ビット数が大きければ大きいほど、細かな信号 (電圧) を検出できる。本研究で用いた RFID チップは、A/D 変換の分解能が 16 ビットであるため、65,536 段階の計測が可能となる。

また、センサ計測に提供できる電流は 0.6mA 程度しかないため、電気抵抗の低いセンサは作動電力が不足する可能性が高く、接続するセンサを高インピーダンスにする必要がある。

4.4.5 RFID ひずみ計測システムの適用事例と計測結果

本システムでは、ひずみ測定のダイナミックレンジを 2000×10^{-6} に設定しており、標準的な仕様として引張側 1500×10^{-6} 、圧縮側 500×10^{-6} の計測範囲としている。これは、多くのコンクリート構造物が、過度な引張応力で健全性を損なうことや、鉄筋の降伏ひずみ量が 1500×10^{-6} 付近であることによる。なお、乾燥収縮等の圧縮ひずみや、圧縮荷重によるクリープ効果を測定対象としたい場合は、ダイナミックレンジ内で圧縮側の計測範囲を広げることも可能である。ひずみ測定における分解能は、 10×10^{-6} 単位である。これは、本システムが極めて微弱な無線電波をエネルギー源として稼働させるために A/D 変換の分解能を制限したためであり、ひずみ量の僅かな変化を捉えることはできないが、例えば、コンクリート構造物の温度による伸縮量や、荷重等での変形からすれば、実用的な範囲と思われる。

(1) コンクリート梁部材の載荷試験による有線ゲージとの比較

50N/mm^2 レベルのコンクリート梁試験体の載荷試験を行い、このシステムを用いた無線通信でのひずみ出力値の挙動を有線ゲージと比較することで性能確認 5) を行った。図 4-16 に用いた試験体の断面を示す。RFID ひずみセンサは、有線ゲージを貼付した被計測鉄筋に沿わせて固定した。

試験体に単純支持・中央部二点載荷で 370kN まで載荷した際の、有線ゲージと RFID ひずみセンサの出力値を連続的にプロットした結果を図 4-17 に示す。計測範囲とした 1500×10^{-6} まで、有線ゲージの出力とほぼ同様な挙動を示し、このシステムが無線通信で目的とする主鉄筋と同様な挙動を示すことが確認された。

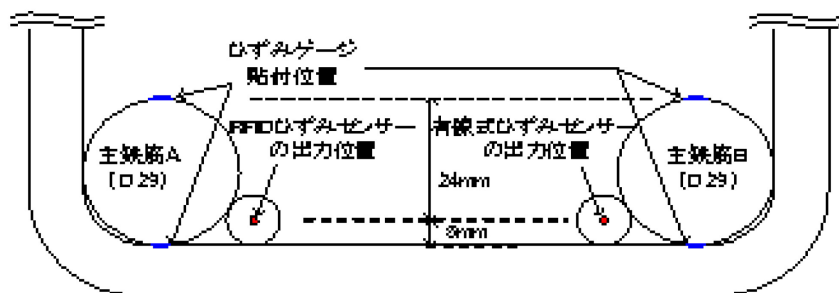


図 4-16 試験体断面における RFID ひずみセンサと有線ゲージの位置

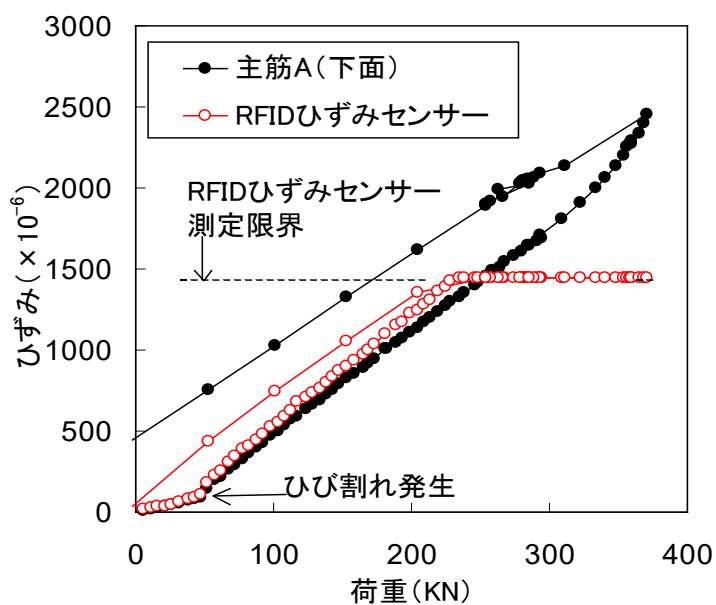


図 4-17 載荷試験における RFID ひずみセンサと有線ゲージのひずみ挙動比較

(2) プレストレス応力の計測への適用検討

PC 構造物は、所定のプレストレス量を導入することが極めて重要であり、緊張管理におけるプレストレス量の測定については様々な手法が提案されている 1)。実構造物の特定部位における短期のプレストレス量を測定するには、コンクリート埋込み型ひずみ計等によって緊張前後のひずみを測定する方法があるが、この手法では、ひずみ計設置に伴う配線や計測するためのデータロガー、電源等が必要となる。また、長期のプレストレス量を推定するためには、供用中の場合では電源の確保やひずみ計の設置作業のための足場設置等、実橋の有線計測は

困難な場合が多い。また、ひずみは収縮、クリープ、リラクセーション等の影響が入っておりこれらを分離するのは難しい。そのため無線かつ電源レスで計測可能な RFID ひずみ計測システムによりプレストレスコンクリート構造物の製造時に生じる各種のひずみが計測可能か検証した。

RFID ひずみセンサを設置した PC 試験体の概要を図 4-18 に示す。鉄筋ひずみセンサ部は中央部断面の上、中、下に設置し、コンクリートひずみセンサ部は上、下にそれぞれ設置した。また、鉄筋ひずみセンサ部と同じ高さの位置の主筋上下に有線のひずみゲージを貼付した後、早強セメントを用いた W/C0.38 のコンクリートを打設した。

PC 試験体の緊張力導入および載荷試験は材齢 35 日に実施した。緊張はセンターホール型ジャッキを用い、緊張力の管理はセンターホール型ロードセルにより行った。

緊張力の導入はひび割れが発生しないように、STEP1:下段の PC 鋼棒を 240kN, STEP2:上段の PC 鋼棒を 482.5 kN (600N/mm²), STEP3:下段の PC 鋼棒を 482.5 kN とした。

有線ひずみは 50kN ごとに計測し、RFID ひずみセンサは適宜リーダライタにより計測して一部では連続計測を行った。なお、定着時の緊張力の損失は有線ひずみゲージの値がほとんど変化しなかったため、無視できると考えられる。また、緊張後に中央部 2 点載荷をひび割れが発生するまで実施した。

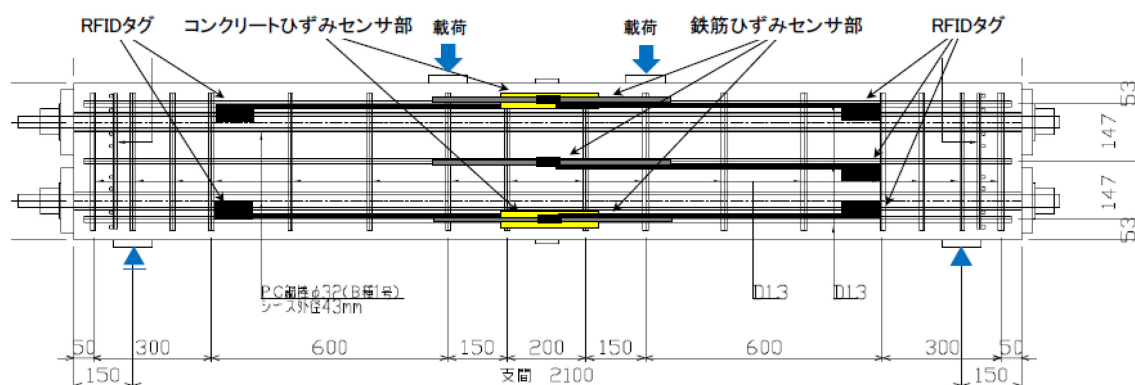


図 4-18 PC 試験体におけるセンサ設置位置の概要

(3) 実験結果および考察

PC 試験体と同じ養生とした緊張力導入時のコンクリートの圧縮強度は 62.4N/mm²、割裂引張強度は 4.06N/mm²、ヤング係数は 30853N/mm² であった。緊張力導入時におけるひずみの測定結果を図 4-19 に示す。

図より、STEP1（下段の PC 鋼棒を 240kN ）、STEP2（上段の PC 鋼棒を 482.5kN）、STEP3（下段の PC 鋼棒を 482.5kN）のいずれにおいても、有線の鉄筋ひずみと、RFID 鉄筋ひずみセンサおよび RFID コンクリートひずみセンサによる値はほぼ同等であることが分かる。PC 鋼棒により導入した緊張力から算出した設計値との比較では、STEP3 終了後の中央断面の自重を考慮したひずみ設計値は主筋上部位置で -400μ に対し、RFID 鉄筋ひずみセンサは -396μ 、コンクリートひずみセンサは -402μ 、下部位置では設計値 -390μ に対し、それぞれ -396μ 、 -398μ とほぼ一致した。以上より RFID ひずみセンサは、圧縮応力下、さらに断面内で応力勾配が生じている場合においても所定部位のひずみが容易に計測でき、短期のプレストレス管理に適用可能であることが分かる。

曲げ載荷試験時におけるひずみの測定結果を図 4-20 に示す。載荷によりひび割れが発生する下部のひずみは、RFID ひずみセンサによる計測を約 1 秒間隔で連続して行った。図より、下部のひずみについては、ひび割れ発生以前は RFID のコンクリートひずみセンサが若干小さい値を示すものの、ほぼ有線のひずみと同様の値を示した。ひび割れ発生直後からは RFID のコンクリートひずみセンサが他よりやや増大する傾向を示した。これはセンサの直径とヤング係数が影響していると思われ、すべてのひずみ計測部の中心軸高さは同じであるが、コンクリートひずみセンサの直径は 30mm で最も大きく（鉄筋ひずみセンサ D10、有線ひずみ主筋 D13）、下縁から発生するひずみの影響を最も受けやすく、さらにヤング係数が小さいためひずみが大きく出たものと考えられる。ただし、最終的に除荷後にはすべて同様の値を示していることから、ひび割れ近傍部以外の端部における付着は確保されていると思われる。一方、中央部および上部では、下端部のひび割れによる影響を受けないため、ひび割れ発生後においても有線ゲージと同様のひずみ値を示したと考えられる。

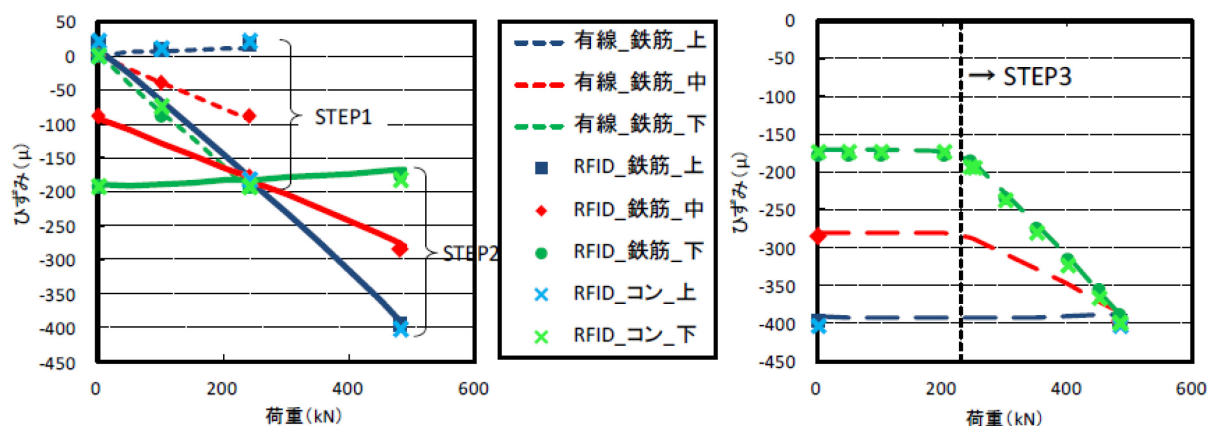


図 4-19 PC 試験体のプレストレス導入時のひずみ挙動

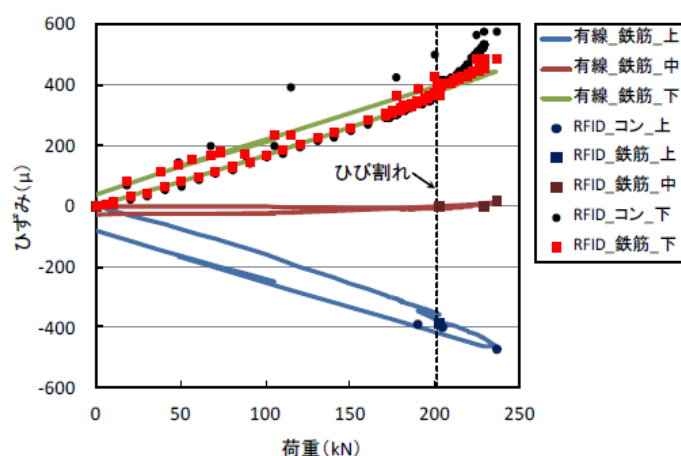


図 4-20 曲げ載荷試験時におけるひずみの測定結果

これらの結果より RFID ひずみ計測システムは有線のひずみゲージ同様にひずみが計測可能であり、プレストレスの緊張管理にも適用可能なことが証明された。

4.4.6 RFID 腐食環境検知システムの概要

第 3 項で検討した鉄箔センサを用いた腐食環境センサとリーダライタ、制御ソフトウェアで構成した RFID 腐食環境検知システムを構築した。このシステムは、RFID ひずみ計測システムと同様に通信インターフェースである RFID タグに増幅回路、A/D コンバータを内蔵したパッシブ型センサインターフェース付 RFID チップが搭載されている。更にセンサ抵抗値を数Ωから MΩ レベルの広いダイナミックレンジを計測範囲としていることから、1kΩ 以下の低抵抗領域と、1kΩ 以上の高抵抗領域をそれぞれ IC 内部の計測回路と増幅値を切り替える仕様としている。パッシブ型 RFID は、リーダライタから受信する電波によりセンサへの電力供給や、出力の送信を行うもので、電池等の電源が不要な特長は、鉄筋腐食のように長期の維持管理に適用することは非常に効果的といえる。また、センサ部は、検知する箇所（センサ設置部）と、無線通信を行う箇所（RFID タグ設置部）を分離して設置できることから、任意の位置にて効率的な計測作業が可能であり、目視では確認できない箇所や、足場を設置しないと確認できない箇所の診断手法としても極めて有効なシステムと考えている。

RFID タグは、通常かぶりに設置し、コンクリート表面にリーダライタのアンテナから電波を与えると同時に、腐食環境センサからの出力を受信し、専用ソフトウェアで演算した結果として電気抵抗値を表示する。更には電気抵抗値から

腐食判定結果を色で表示する機能も備えている。

このシステムも RFID ひずみ計測システムと同様に内蔵するメモリへ、数回分の計測結果を日時情報とともに記憶させることが可能である。通信周波数は 13.56MHz (HF 帯) を使用しており、自由空間において 15cm 以上の通信距離を確保している。

4.4.7 腐食センサの構造

腐食環境センサは検知部である腐食センサと、通信部である RFID タグがケーブルで接続されている。外観は図 4-21 に示すとおり、鉄筋と同じ主成分でできた箔状のセンサ（以下、鉄センサ）が、外装部と被覆モルタルの間に埋設されている。鉄センサを保護する外装部は、コンクリート施工時の衝撃に耐え、構造物の耐力を低下させない高強度モルタルとセラミックス製が用意されている。これらの素材は設置構造物であるコンクリートと一体化しやすいものとしており、変形した楕円形状により、設置時にコンクリートの充填の妨げになり、ジャンカが発生することやセンサ設置下面へのブリーディング水の滞留を回避できるものとした。



図 4-21 腐食センサの外観と構造

4.4.8 RFID 腐食環境検知システムの計測ソフトウェア

RFID 腐食環境検知システムの計測ソフトウェアの計測画面を図 4-22 に示す。このソフトウェアでは腐食環境センサ内部の鉄箔センサの電気抵抗を計測したアナログ値を、RFID の IC チップ内でデジタル値に変換した値をリーダーライタで受信し、式 4-2 で温度補正をした値を表示する。表示にあたっては、

電気抵抗の値だけでなく、評価結果を「色」で表示することとしている。この機能は、利用者が直感的に結果を理解できるような仕様とした。

センサが健全な場合は、「青」のインジケータが点滅し、センサが腐食に至った場合は、「赤」のインジケータが点滅する。「黄」はセンサに変化が生じた場合となる。



図 4-22 腐食環境検知システムのソフトウェア画面

4.4.9 RFID 構造物診断システムの耐久性

RFID 腐食環境検知システムおよび RFID ひずみ計測システムは通信インターフェースに用いるパッシブ RFID に半導体部品を採用していることから、コンクリート内部に埋設した際の長期耐久性について確認が必要である。

以下、各種の促進耐久性試験を実施し、RFID タグに異常が発生しないことを確認している。

- (1) 耐水圧試験：200kPa の水圧をかけたチャンバー内に RFID タグを 10 分間静置し、RFID タグの通信可否を確認
- (2) 熱衝撃試験：JIS C0025, (IEC 60068-2-14, MIL-STD-202 883)に準拠し実施
- (3) -40℃ と 85℃ の各温度で 10 分間静置したのち、30 秒以内に急冷、急加熱

を 10 サイクル繰り返し、RFID タグからの出力値について試験前後の変化を確認。

- (4) 振動耐久性試験：JIS60068-2-6,(IEC 60068-2-6)に準拠し実施
- (5) RFID タグの三次元 XYZ の各方向に 10Hz～2 kHz までの範囲で、振幅変位量もしくは加速度が一定になるように、レーザー変位計で変位量を確認しながら正弦波振動を付与
- (6) 促進試験：JIS H 8502「めっきの耐食性試験方法（中性塩水噴霧サイクル試験）」に準拠し、278 サイクルまで実施。所定のサイクル時の乾燥時に RFID タグをリーダライタで計測
- (7) 凍結融解試験：10×10×40mm の試験体に RFID タグを埋設して実施。コンクリートに与える影響と RFID タグの動作確認を実施

結果、いずれの試験においても RFID は試験後の不具合はなく、別途実施した促進試験においては、本腐食促進試験が 3 サイクルで約 1 年の暴露環境に相当していることから、大気暴露 90 年相当を模擬、90 年程度の長期耐久性が期待できるシステムである。

4.5 実構造物における長期供用性の確認

4.5.1 モニタリング対象の構造物

RFID 腐食検知システムを橋脚の補修工事に適用して、その補修効果を確認するためのモニタリングシステムとして活用し、10 年間にわたりシステムの動作確認とモニタリング手法としての適用課題に関して経時的に調査した。モニタリング対象とした構造物は、日本国内の北海道で供用されている 1973 年に建設された橋梁の橋脚である。この橋梁は、海岸から 200m 付近に立地しており、厳しい塩害環境なことから、2009 年に調査をした結果、腐食した鉄筋が一部露出する等の劣化が確認されたため、2010 年に全面的な補修工事を実施した。2010 年の補修工事においては、補修工事の効果確認を長期的に確認することを目的に、鉄筋腐食を検知する各種センサを設置するとともに従来手法である自然電位計測により定期的な調査を計画した。加えて、5 年目、10 年目にはコアボーリングを実施し、EPMA (Electron Probe Micro Analyzer) によりコンクリート中の塩化物イオンの浸透状況について分析した。

4.5.2 比較した鉄筋腐食を検知する各種センサ

(1) エクспанジョンリングセンサ

エクспанジョンリングセンサは図 4-23 および図 4-24 に示すとおり、6 段の検知部を備えた円柱状のセンサで、通常は既設構造物にコアボーリングで削孔

した孔に設置するセンサである。各検知部との電位差と電流密度を計測するために、別途カソード部分の設置を行う。

通常は、表面に近い検知部である、A1 部から深さ方向の A6 まで順番に腐食が進むことを想定し、深さ方向に腐食が進行する状況をモニタリング可能としている。

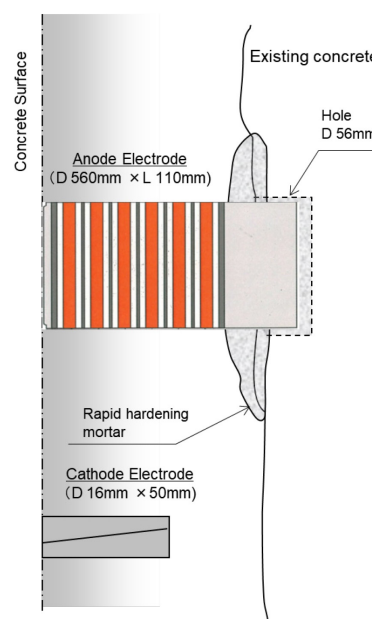
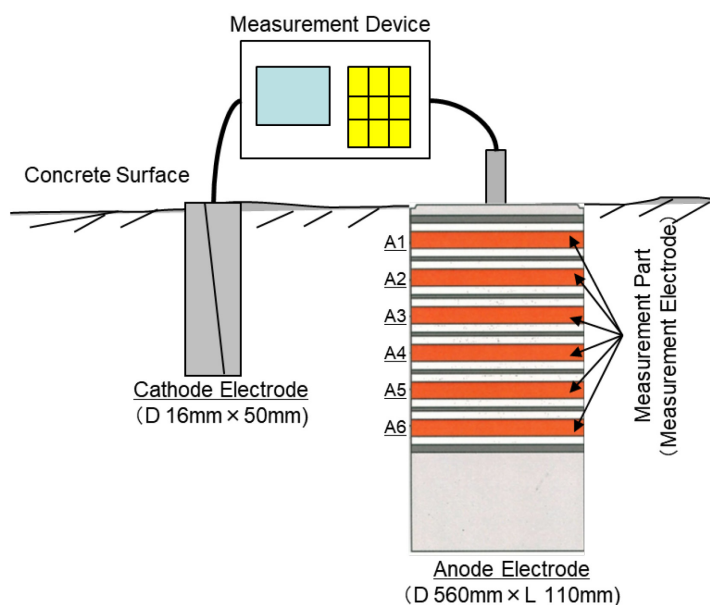


図 4-23 エクспанジョンリングセンサ 図 4-24 エクспанジョンリンセンサの設置方法

4.5.3 各種センサの設置

エクспанジョンリングは既設構造物にコアボーリングにて削孔した孔に設置するのが一般的であるが、対象が断面修復であったため、既設のコンクリートを鉄筋部まではつた後に、表面を設計かぶり厚に合わせて設置した。カソード電極は断面修復にてコンクリート吹きつけを行ったのち、固まる前に埋設した。

RFID 腐食環境センサは、図 4-25 に示すとおり既設のコンクリートをはつた後にアンカーボルトで固定し、設計かぶりの 40 mm の位置と 80 mm の位置で二段階の計測が可能となるように設置した。通信部はかぶり 50 mm に位置に速硬性モルタルで固定した。

各センサは、図 4-26、図 4-27 に示すとおり橋脚の海側、中央、山側の違いを

捉えるように設置した。エクспанジョンリングセンサは中央と海側に 2 台、RFID 腐食環境センサはか海側，中央，山側にかぶり厚の 2 段階で計 6 個設置した。

これらのセンサシステムと比較を行うため，鉄筋とケーブルを接続し，従来手法である自然電位を定期的に計測した。

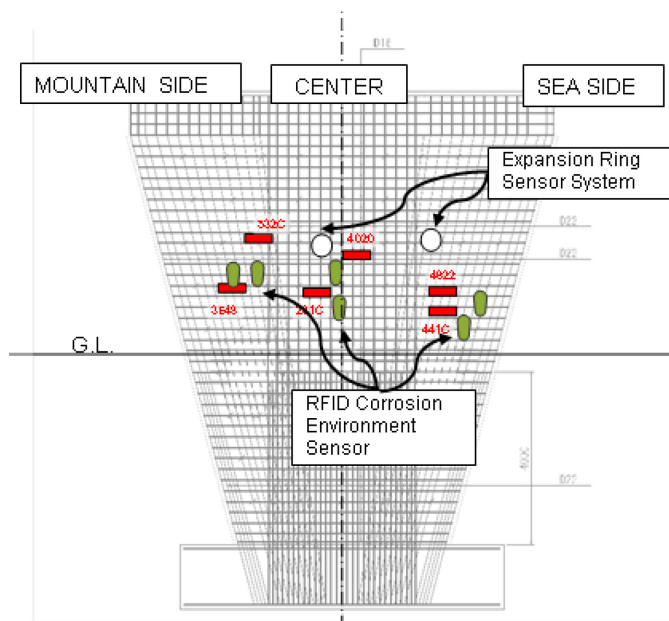
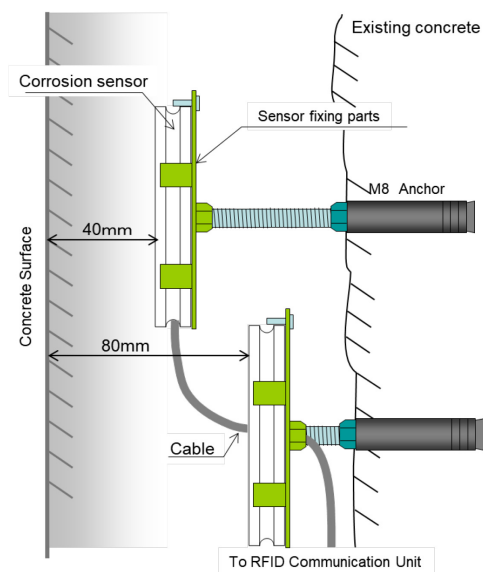


図 4-25 RFID 腐食センサの設置方法 図 4-26 各センサの配置位置



図 4-27 各種センサの設置状態

4.5.4 計測方法と計測項目

(1) 計測方法

図 4-28 にエクспанジョンリングおよび RFID 腐食環境センサそれぞれの計測状況を示す。エクспанジョンリングセンサは専用の計測機を用いて別途取り付けられたカソード部との電位差および腐食電流を計測した。

RFID 腐食環境検知センサは専用のリーダーライターで埋設した RFID 部に電波を送信し、検知部の抵抗値を計測し、リーダーライターで計測した抵抗値を受信した。

自然電位は、施工時に鉄筋に取り付けたケーブルとコンクリート表面間の計測を行った。

(2) 計測時期

定期的な計測は、最初の 5 年間を年 1 回、その後、7 年目と 10 年目にそれぞれ 1 回、10 年間で計 7 回実施した。5 年目と 10 年目には構造物よりコアを採取し、塩化物イオンの浸透状況を把握した。



図 4-28 各センサの計測状況

4.5.5 計測結果

(1) エクспанジョンリングセンサの電流密度変化

エクспанジョンリングセンサの電流密度の推移を図 4-29 に海側に設置したもの、図 4-30 に中央部に設置したものの計測結果を示す。海側に設置したエクспанジョンリングセンサは、1～4cm までの検知部は 4.5 年で、5.5 年ですべての検知部が腐食を判定した。中央部に設置したエクспанジョンリングセンサは 2.5 年経過時点ですべての検知部が腐食を判定する結果となった。

本来、エクспанジョンリングセンサは表面からの塩分浸透により段階的に腐食を判定する構造であるが、センサ本体と構造物の接触界面（円筒状の側面）を塩分が伝って浸透したことで、短期間に最深部の 6cm の検知部まで腐食したと推察される。

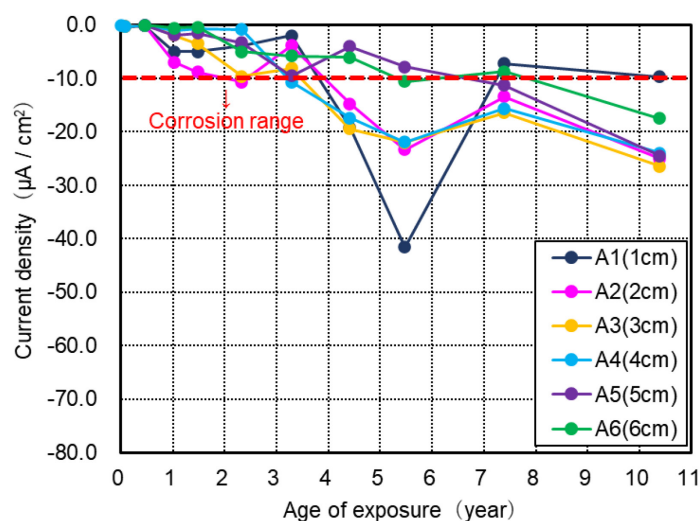


図 4-29 海側に設置したエクспанジョンリングの計測結果

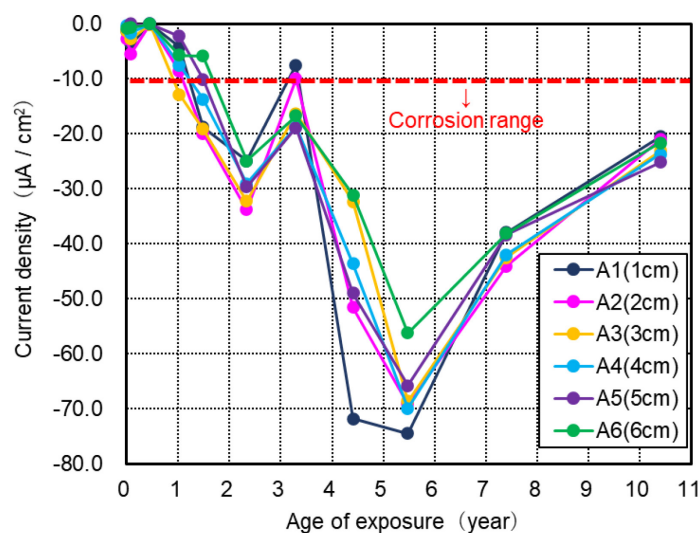


図 4-30 中央に設置したエクспанジョンリングの計測結果

(2) RFID 腐食環境センサの計測結果

RFID 腐食環境検知システムについては、10 年経過後も問題なく計測が可能であり、実用的な長期耐久性を確認できた。図 4-31 に示すとおり、10 年経過後も 6 個中 5 個は腐食せずに健全な状態と判定されたが、中央部、かぶり 80mm に設置したセンサが 1 個は腐食を判定した。また、腐食の判定をしたセンサの設置部の表面には幅 0.2mm 程度のひび割れが見られており、ひび割れがセンサ位置まで貫通し、水分とともに塩化物イオンが表面から侵入した、もしくは後述するとおり補修前に内在していた塩化物イオンが補修部に移動したことからセンサに腐食が生じたと推察される。

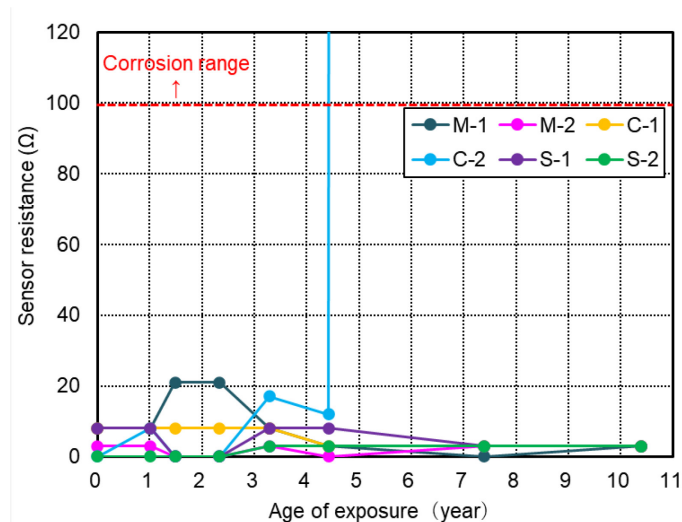


図 4-31 RFID 腐食環境センサの計測結果

(3) 自然電位計測の結果

図 4-32 に内部鉄筋の自然電位計測の結果を示す。自然電位については、どの位置の鉄筋においても、施工当初より腐食の発生が不確定領域の計測結果となった。その後も 10 年経過するまで、大きな変化はなく、90%以上の腐食を示す領域には至っていない。なお、10 年時に目視検査を行った結果は、構造物全体の表面に複数のひび割れが見られ、局所的には塩化物イオンの侵入が進行していることが推察された。

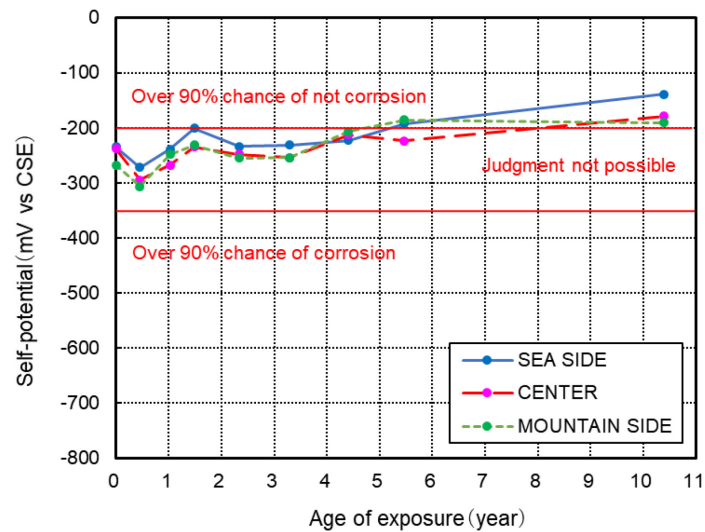


図 4-32 自然電位の計測結果

(4) 塩化物イオンの分布状況

5 年目、10 年目に採取したコアの塩化物イオンの浸透状況を EPMA で分析した結果を図 4-33 (5 年目)、図 4-34 (10 年目) に示す。5 年目では、海側を除き、表面から 5 mm 程度の場所が最も塩分濃度が高く、14~18kg/m³ 程度を示した。RFID 腐食センサを設置したかぶり 40 mm の位置では、どの位置においても 1 kg/m³ 程度であり、80 mm の位置では 0.7~3 kg/m³ 程度と場所による差が顕著であり山側の位置の塩分濃度が最も高い結果であった。

10 年目の結果では、5 年目と同様に表面から 5 mm の位置の塩分濃度が最も高く 15~18 kg/m³ 程度を示した。かぶり 40 mm の位置では、0.9~1 kg/m³ 程度であり、80 mm の位置では 1.6~10 kg/m³ 程度と場所による差が顕著であり 5 年目と同様に山側の位置の塩分濃度が最も高い結果であった。

この結果は、表面付近の塩分濃度は海からの飛来塩分による影響を受けており、内部の 90 mm 付近より深い位置の塩分濃度は、補修前に浸透していた内在塩分が作用していると推察される。

また、山側のかぶり 80 mm の位置における塩分濃度について、5 年目と 10 年目を比較すると 10 年目においては、5 年目の 3 倍以上の濃度となった。これは補修前に浸透した内在塩分が、補修部分との濃度差により、時間経過とともに表面側に移動してきたものと推察される。

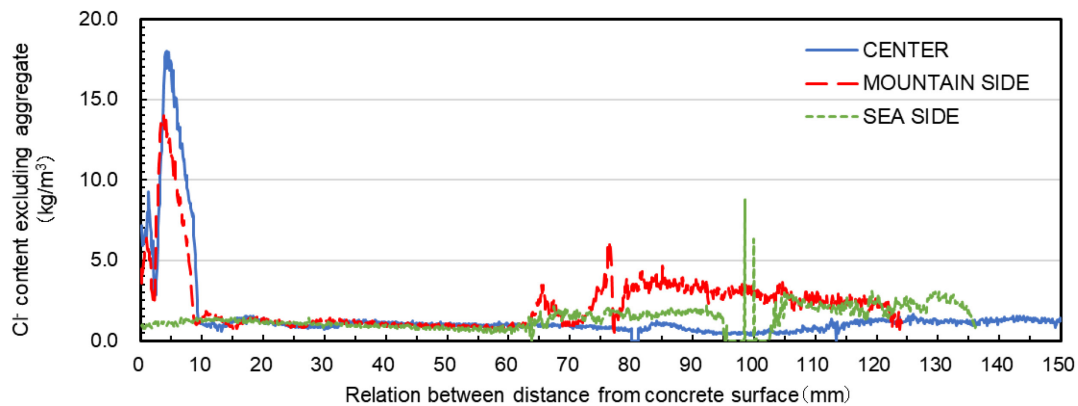


図 4-33 5 年目に採取したコアを EPMA 分析した結果

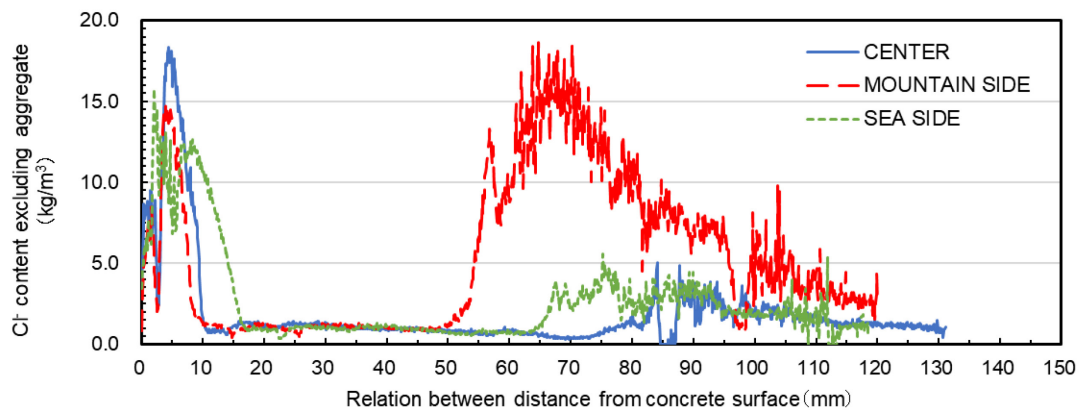


図 4-34 10 年目に採取したコアを EPMA 分析した結果

(5) 各種計測結果の総合的な評価

RFID 腐食環境検知システムやエクспанジョンリングセンサにおいても腐食の判定が確認されていることから、一部は再度の補修計画を立案する時期であると判断される。また、EPMA 分析の結果からは、分析位置、深さ位置によっては鉄筋が腐食する塩分濃度に達しており、10 年目の時点では何らかの処置が必要な状態と考えられる。

なお、塩化物イオンは表面から浸透しているものの、鉄筋の位置までには達しておらず、補修前の既設部分に存在している内在塩分の表面側への移動が鉄筋を腐食させる可能性が高いと判断できる。

ただし、自然電位計測では確実な腐食を捉えていないことから、実際の鉄筋においては、構造耐力を低下させるような鉄筋腐食には至っておらず、10 年目の時点では、一部に軽微な鉄筋腐食が生じているレベルであると推察される。

RFID 腐食環境センサは、表面に生じたひび割れからの塩分浸透、もしくは内在塩分の表面側への移動により一部のセンサが反応していると考えられることから、構造物内部の状態を適切に評価できているといえる。また、自然電位の結果と比較しても、予防保全として活用するには適切な評価を行えていると評価できる。なお、RFID 腐食環境センサを設置した箇所のコンクリート表面は他の箇所と比べても同等であり、センサ自身が構造物に与える悪影響はない。

一方でエクспанジョンリングセンサはすべての検知部に腐食が確認されており、実際の塩化物イオンの浸透度合い、自然電位からみた鉄筋の腐食状態とはかけはなれた結果となった。エクспанジョンリングセンサのように表面に露出するセンサは、設置や計測作業がしやすい一方、センサの設置自体が劣化因子の侵入を促す可能性があることが示唆された。

(6) 実構造物で 10 年間 RFID 腐食環境検知システムを供用した結果

- (1) RFID 腐食環境センサは構造物内部の塩化物イオンの浸透状態を適切に捉えていると考えられる。
- (2) エクспанジョンリングセンサは、表面から露出する部分があり、塩分が侵入することから、早期に腐食を判定する懸念がある。
- (3) 本研究の対象構造物は、表面からの塩化物イオンの侵入と内在塩分の表面側への移動により、早期に補修が必要な時期と考えられる。

4.6 第 4 章のまとめ

本章では、RFID 技術の普及状況に加え、建設分野における活用事例を整理し、センサインターフェースを有する RFID の活用検討として、ひずみ計測と鉄箔センサを接続して、実際のシステム構築を実施した。

システム構築として、通信インターフェースとして、RFID にひずみゲージ方式の鉄筋センサと第 3 章で検討した鉄箔センサの接続を行い診断システムとして構築した。また、それらのシステムの実用性を評価するため、ひずみ計測システムについては、コンクリート梁にひずみ計測システムを適用し、有線型ひずみゲージとの計測結果の比較を行った。更には、ひずみ計測システムの効果的な利用方法として期待されるプレストレス構造物の緊張力管理を想定して、大型試験体により有線型ひずみゲージとの挙動比較を実施した。

第 3 章で検討した鉄箔センサを RFID に接続した腐食環境検知システムについては、実橋梁の補修工事を対象に適用して、従来手法である自然電位法と海外製のセンサとの比較を長期的に実施し、腐食環境検知システムの耐久性の確認とともに、計測結果の妥当性について、構造物から採取したコアの塩分分析結果と比較し評価した。

- (1)RFID ひずみ計測システムを構築し，有線型ひずみゲージによる計測と比較した結果，同等の性能を示した。
- (2)RFID ひずみ計測システムは，プレストレスコンクリート構造物の緊張管理を行ううえで有効なシステムである。
- (3)RFID 腐食環境検知システムを橋梁の補修工事に適用し，補修効果の確認を目的に運用した結果，10 年間，問題なく計測が行えることを確認し，コンクリート構造物の維持管理を行うに必要な耐久性を十分有していることが確認された。
- (4)実構造物で 10 年間，RFID 腐食環境検知システムを供用した結果，RFID 腐食環境センサは構造物内部の塩化物イオンの浸透状態を適切に捉えていると考えられる。
- (5)実構造物で 10 年間，エクспанジョンリングセンサを供用した結果，表面から露出する部分があるため，塩分が早期に侵入しコンクリート内部を適切に判定することが困難である。
- (6)RFID 構造物診断システムに適用した IC チップをはじめとした電子部品については，各種耐久性試験の結果，問題なく動作できることが確認された。

第4章の参考文献

- 1) 矢吹信喜, IC タグの建設分野での活用, 建設マネジメント技術, Vol.6, pp.23-27, 2007
- 2) <http://www.dot.ca.gov/hq/research/maintenance/docs/qnde.pdf>
- 3) 鈴木伸吾, 池本有助, 浅間一, パッシブ型 RFID カセンサモジュールの開発, 第25回日本ロボット学会学術講演会, 3L21, 2007
- 4) M.SC.Mateusz Lisowski, Tadeusz Uhl, Wireless passive RFID-Based sensor for crack detection-second stage of investigations, Key Engineering Materials, Vol.588, pp.352-359, 2014
- 5) Walter D.Leon-Salas, Ceki Halman, A RFID Sensor for Corrosion Monitoring in Concrete, IEEE SENSORS JOURNAL, Vol.16, No.1,2016
- 6) Burak Ozbey, Vakur B Erturk, Hilmi Volkan Demir, Ayhan Altintas, Ozgur Kurc, A Wireless Passive Sensing System for Displacement/Strain Measurement in Reinforced Concrete Members, Sensors, Vol.496, No.16, 2016
- 7) 小川彰一. RFID タグのグラウト充填検査への適用に関する検討, コンクリート構造物の補修, 補強. アップグレード論文報告集. 2006, 6, pp.61-66
- 8) 工藤正智, 井坂幸俊, 江里口玲, 鉄箔センサ機能付き RFID を用いた表面被覆材内部の腐食環境の検知に関する検討, 土木学会第73回年次学術講演会講演概要集, Vol.73, No.10, 2016
- 9) Akira Eriguchi, Hiromi Fujiwara, Hayato Itaya, Toru Wakabayashi, Shunsuke Otani, Yukitoshi Isaka, Detection sensitivity of iron-foil corrosion sensor in simulated concrete solution, XV International Conference on Durability of Building Materials and Components, DBMC 2020, Barcelona, Pages 709-716 (2020).
- 10) Akira Eriguchi, Wireless Monitoring system for reinforcement corrosion detection, CONCRETE, Vol.56, Issue 01, Pages 17-18(2022).
- 11) P.Schiessl, M,Raupach, Monitoring System for the Corrosion Risk of Steel in Concrete Structure, CONCRETE INTERNATIONAL, Vol.14, No.7, Pages 52-55 (1992).
- 12) M,Raupach, P.Schiessl, Monitoring the Risk of Reinforcement Corrosion Using the Expansion-Ring-System, Proceedings of the 1st fib Congress, Vol.2, Pages 171-178 (2002).
- 13) Yosuke AZUMA, Shinichi MIYAZATO, Takashi AYATA, Kouzou MUKAI, Forecast of Corrosion Initiation Period for Steel in Mortar Using Sacrificial

Electrode, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.57, Issue 10, Pages 1025-1030 (2008).

第5章 RFID の機能を活用した応用と今後の可能性

5.1 RFID をコンクリートに投入する既往の検討

コンクリート構造物は世の中で流通する製品のなかでは、製造番号やシリアルナンバーを付与することが困難なものである。何故なら多くのコンクリート構造物はレディミクストコンクリート（以下、生コン）である半製品の状態で供給されるため、物理的な番号や目印を固定することができないためである。プレキャスト製品のように工場で完成品として現場に納入する場合は、各製造元で製品番号やバーコードを表面に記載することが可能であるが、土木構造物の場合、長期間、屋外に晒されることで記載した製品番号等が視認できなくなることも多く、建築物では外装材や内装材によって表面的な目印の確認が困難になることも多い。このような状況から、無線で固体識別が可能な RFID タグをコンクリート内部に埋設して、製造番号を付与しトレーサビリティに活用する手法について多くの研究がされてきた。また、一部の生コン製造者においては瑕疵保証保険を付与するための品質保証のツールとして、材料計量値等を書込んだ専用の RFID タグを生コン製造時に投入し出荷できる体制を整備している。

一方で、これらの先行事例はまだまだ珍しく、RFID タグのコスト負担や取り扱い方法に多くの課題があり、実用レベルで普及しているとは言い難い。

コンクリートに RFID タグを活用するための検討は、特にトレーサビリティを目的としたものが盛んに行われてきた。たとえば、国土技術総合政策研究所が中心となり活動したコンクリートトレーサビリティ技術研究会では、コンクリートの使用材料に関する偽装防止を目的に RFID タグを生コンに投入し、RFID タグの固有 ID と、コンクリートに使用した材料の諸元や配合情報を紐付けするシステムを検討し、技術的な課題や実用化に向けた提言を行った¹⁾。また、コンクシッドシステム株式会社は、いち早く生コンに投入する専用 RFID タグと生コン製造時に RFID タグを投入する方法を実用化し、RFID タグのメモリ内に材料計量値をはじめとする製造情報を記録して、コンクリートの品質を構造物に記録することで瑕疵保証保険付コンクリートを出荷できる体制を整備している²⁾。

これらの既往の事例についても、実用面ではいくつかの課題がある。たとえば、①生コンに投入した場合、通信指向性を有する RFID タグは投入したすべての RFID タグの 30%程度しか読取れない可能性があるため、読取り確率を考慮し多くの数量を投入する必要がある。②市販されている多くの RFID タグはコイン型やラベルタイプ、スティック状のため、コンクリート内部に設置する場合、専用の治具や取り付け方法について通信指向性や鉄筋等の通信障害物を考慮し都度検討する必要がある。③RFID タグを取り付けるための作業工数が増加する。

④RFID タグはコンクリート内部では異物として認識されることが多く、構造体の強度や耐久性等に悪影響を与えるのではないかという懸念が生じる。⑤RFID タグの費用負担が生じる。といったことである^{3),4)}。

5.2 RFID を埋設したモルタルスペーサ

コンクリートに製造番号を付与することや、コンクリートに関わる諸情報を記録するために、RFID タグの活用が有効であることは、今までの検討事例に加え、土木学会コンクリート標準示方書 維持管理編⁵⁾の情報の記録方法としての有効性が記述されており一定の認知が進んでいるものの、前項で示したいいくつかの課題が実用化の障害になっている。

そこで、コンクリート構造物の施工の際に汎用的に使用するモルタルスペーサにあらかじめ RFID タグを埋設し、コンクリート構造物に容易に適用できる技術を検討した。

5.2.1 スペーサに埋設する RFID タグの諸条件

スペーサに埋設する RFID タグは、コスト面やスペーサに埋設できるサイズを考慮して、表 5-1 に示す諸条件を満たすものを選定した。図 5-1 に選定した RFID タグの外観を、表 5-2 に選定した RFID タグの仕様を示す。

表 5-1 モルタルスペーサに埋設する RFID タグの諸条件

形状	平面上であり出来る限り占有体積が小さい（市販のスペーサに埋設できるサイズ）
周波数	コストが安価で、水分（コンクリート中の水分）、金属（鉄筋）の影響を受けにくい
外装部	まだ固まらないモルタルに埋設するため、防水仕様とする
通信距離	自由空間において 10～15cm 程度（自由空間）

表 5-2 選定した RFID タグの仕様

通信規格	HF 帯 ISO15693 I-CODE SLI
サイズ	直径 15.5mm, 厚さ 2.8mm
メモリ容量	128 バイト（内ユーザーメモリ 112 バイト）



図 5-1 選定した RFID タグの外観

5.2.2 RFID タグのモルタルスぺーサへの埋設と破壊強度の確認

図 5-2 に示すとおり，中心位置に RFID タグを埋設したスぺーサと市販のスぺーサの強度試験を行い比較した。いずれのスぺーサも 70mm 厚とした。載荷方法は，図 5-3 に示すとおり， $\phi 22\text{mm}$ の鉄棒を介してスぺーサ本体の圧縮方向と曲げ方向で実施した。試験結果を表 5-3 に示す。RFID タグの埋設による強度低下は認められず，市販のスぺーサと同等の強度を有していることを確認した。なお，モルタルスぺーサは，かぶり厚確保のために設置することから，様々なサイズが準備される。RFID タグを埋設するスぺーサについても，かぶり厚の設計値に合わせて提供することとし，図 5-4 に示すとおり，どのサイズにおいても RFID タグの埋設位置は，図 5-2 と同様に中心位置に埋設することとしている。

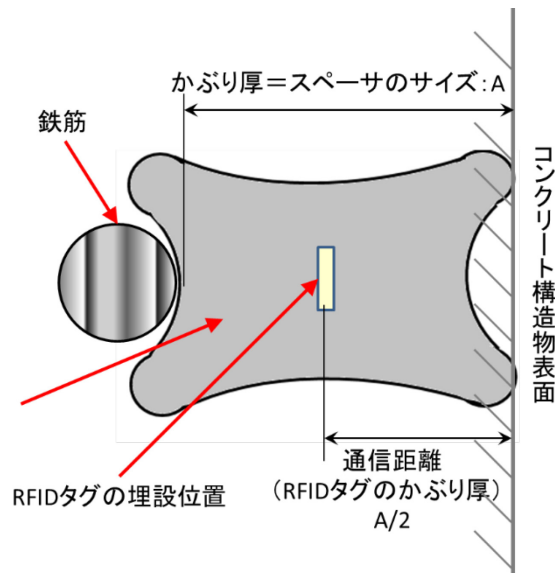


図 5-2 RFID タグを埋設したモルタルスぺーサの概要と埋設位置



図 5-3 RFID タグを埋設したモルタルスパーサの破壊試験状況

表 5-3 RFID タグを埋設したモルタルスパーサの破壊強度

試験項目	市販スパーサ	RFID タグ 埋設スパーサ
縦方向破壊時荷重(n=3 平均)	10.2 Kn	10.9 kN
横方向破壊時荷重(n=2 平均) スパン 40mm	2.2kN	2.1kN

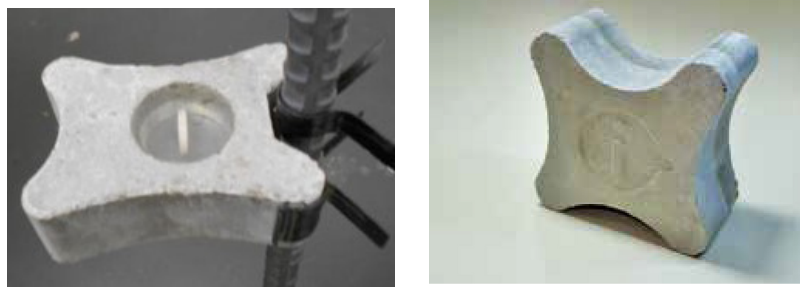


図 5-4 RFID タグを埋設したモルタルスパーサ

(左：RFID タグの埋設状態が確認できるようにしたデモ品，右：外観)

5.2.3 RFID タグの読み取りに用いるリーダーライタ

RFID タグをコンクリートに埋設したときの通信性能に関しては、小川らの研究⁶⁾や杉山らの研究^{7),8)}で、鉄筋の影響や RFID タグの形状、種類による指向性の違い等、様々な実験が実施されており、RFID タグのアンテナ仕様や種類、鉄筋との位置関係等に大きく影響を受けることが確認されている。

RFID タグの通信性能は、既往の検討にあるように種類や形状、アンテナ仕様

に加え，コンクリート内部においては鉄筋や水分の影響を受ける。一方で，それらの要因を除けば，RFID タグの通信性能は，リーダーライタの出力やアンテナサイズが支配的要因になる。そのため，リーダーライタの選定は RFID タグの通信性能を評価するうえで極めて重要である。

表 5-4 に RFID タグを埋設したモルタルスペースの読み取りに用いたリーダーライタの仕様と，図 5-5 に外観を示す。

表 5-4 リーダーライタの基本仕様

無線規格	誘導式読書き通信設備 無線周波数 13.56MHz
通信規格	ISO/IEC15693 ISO/IEC 18000-3(mode1)
変調方式	送信：ASK 受信：FSK, ASK
通信距離	0～300mm（タグ種類によって変動）
対応タグ	ISO/IEC15693 ISO/IEC 18000-3(mode1)対応タグ
複数同時読取機能	アンチコリジョン機能有り
データ転送方式	Bluetooth, USB



図 5-5 リーダーライタの外観

5.2.4 RFID タグを埋設したモルタルスぺーサの通信距離と通信指向性

RFID タグを埋設したモルタルスぺーサをコンクリートに設置することを想定し、RFID タグと前述のリーダーライタにより通信性能の確認実験を行った。

モルタルスぺーサは、構造物の設計仕様に伴い、様々なサイズが必要である。スぺーサの中心部に RFID タグを埋設させることを条件として、RFID タグを読み取れる距離（通信距離）を確認し、RFID タグを埋設したスぺーサとしての適用サイズを確認した。また、モルタルスぺーサが傾くことを想定した通信指向性についても同試験体を用いて確認した。

試験体は図 5-6 に示すとおり、100×100×400mm の型枠に 50mm の深さまでコンクリートを打ち込み、一定の硬化が進んだ時点で RFID タグを測定面に平行に設置した水準を 0° として、測定面である試験体表面に対して 15° 単位で傾けていき、90° まで 50mm 間隔の位置に 7 水準の状態で設置した。埋設した RFID タグの計測は、図 5-6 に示すとおり両面の測定面から、RFID タグの埋設位置にリーダーライタのアンテナをかざして計測した。また、リーダーライタによる計測は実用面を考慮して、試験体測定面とリーダーライタのアンテナとの距離を 15mm と 30mm の 2 水準で実施した。なお、試験体の測定面以外の面から回り込む電磁波の影響を除去するため、測定面以外の面にはアルミテープを貼付した。図 5-7 に測定状況を示す。

通信距離の測定は、RFID タグの中心位置から試験体の測定面までの距離を RFID タグのかぶり厚として、図 5-8 に示すとおり 10×100×400mm のコンクリート板を 10 枚まで重ね、20～120mm までの 11 水準で計測した。

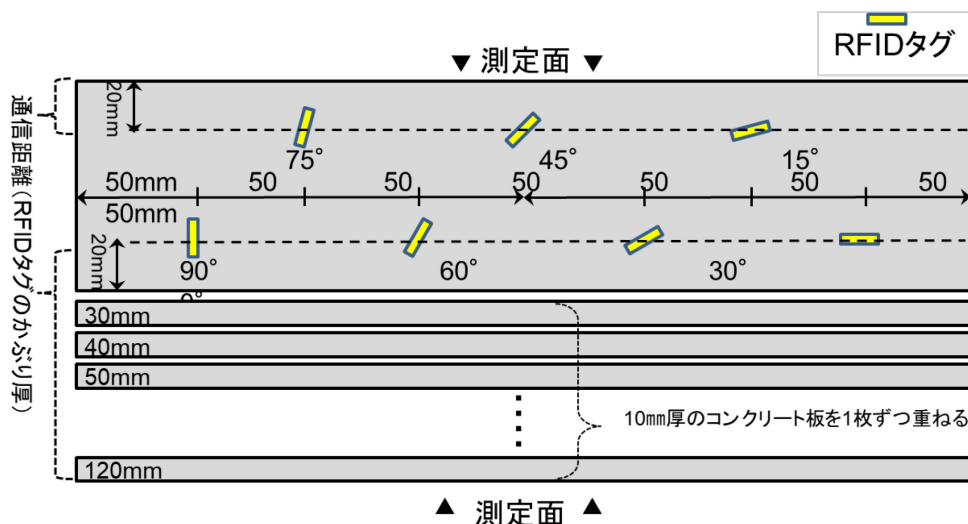


図 5-6 埋設した RFID タグの通信性能を確認するための試験体概要

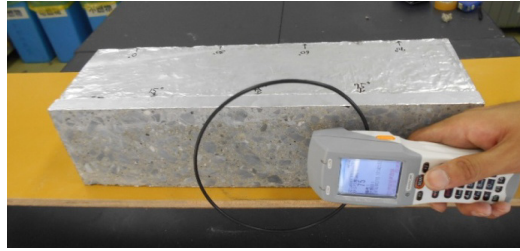


図 5-7 通信性能の測定状況

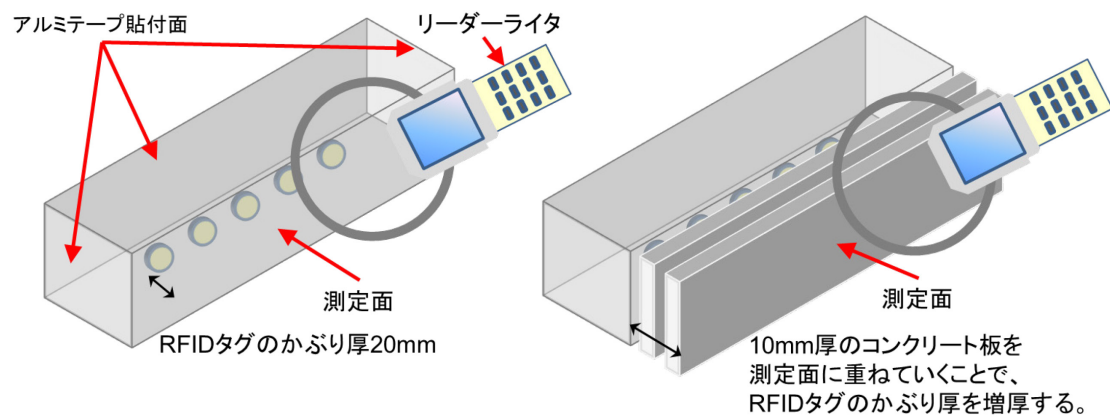


図 5-8 埋設した RFID タグの通信距離計測方法

5.2.5 通信指向性と通信距離の計測結果

表 5-5 に測定面とリーダーライタのアンテナ面の距離を 15mm とした際の実験結果を、表 5-6 に測定面とリーダーライタのアンテナ面の距離を 30mm とした際の実験結果を示す。RFID タグを読み取れた水準を○を読み取れない水準は×として示した。いずれの条件においても、 0° 、 15° の設置角度のみ RFID タグを読み取れる結果となり、 30° 以上の傾きを持った設置方法では RFID タグを読み取れない結果となった。また、通信距離については、リーダーライタのアンテナと試験体表面の距離が 15mm の水準で最大 70mm の結果であった。

本結果より、RFID タグを埋設したスペーサが適切に設置されずに 30° 以上傾いた状態で設置された場合においては、RFID タグを読み取ることができないこととなり、 $0^\circ \sim 15^\circ$ の傾きの範囲で設置された場合のみ RFID タグを読み取る結果となった。また、通信距離の計測結果では、リーダーライタのアンテナが測定面から 30mm 離れた距離において、RFID タグのかぶり厚が 40mm の位置まで通信できている。実際のスペーサの設置状態は、図-2 に示すとおり RFID タグと測定面までの距離はスペーササイズの $1/2$ となるため、80mm 厚までの

スぺーサに適用しても問題なく検査システムとして適用できると考えられる。さらに、リーダーライタのアンテナを測定面から 15mm に近づけることで、RFID タグのかぶり厚が 70mm まで読み取れることから 140mm 厚のスぺーサに適用することも充分可能と考えられる。

なお、RFID タグをスぺーサの中心位置に設置することで、RFID タグと鉄筋との距離も一定以上離れた位置で確保できるため、無線通信における鉄筋の影響を受けにくい設置状態を保ち安定した無線通信が可能である

表 5-5 測定面とリーダーライタの距離を 15mm とした際の通信性能















RFIDタグと 試験体 測定面の 通信角度 θ								
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
RFIDタグのかぶり厚(mm)	20	○	○	×	×	×	×	×
	30	○	○	×	×	×	×	×
	40	○	○	×	×	×	×	×
	50	○	○	×	×	×	×	×
	60	○	○	×	×	×	×	×
	70	○	○	×	×	×	×	×
	80	×	×	×	×	×	×	×
	90	×	×	×	×	×	×	×
	100	×	×	×	×	×	×	×
	110	×	×	×	×	×	×	×
	120	×	×	×	×	×	×	×

表 5-6 測定面とリーダーライタの距離を 30mm とした際の通信性能

RFIDタグと 試験体 測定面の 通信角度 θ								
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
RFIDタグのかぶり厚(mm)	20	○	○	×	×	×	×	×
	30	○	○	×	×	×	×	×
	40	○	○	×	×	×	×	×
	50	○	×	×	×	×	×	×
	60	×	×	×	×	×	×	×
	70	×	×	×	×	×	×	×
	80	×	×	×	×	×	×	×
	90	×	×	×	×	×	×	×
	100	×	×	×	×	×	×	×
	110	×	×	×	×	×	×	×
	120	×	×	×	×	×	×	×

5.3 RFID タグを埋設したスペーサのかぶり厚検査システムの構築

コンクリート構造物にとって、かぶりは耐久性を確保するために重要な箇所である。2009 年に改定された日本建築学会の建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事により鉄筋コンクリート建造物のかぶり厚の規定ができ、土木学会のコンクリート標準示方書においても、「かぶりは、コンクリートの品質、鉄筋の直径、構造物の環境条件、コンクリート表面に作用する有害な物質の影響、部材の寸法、施工誤差、構造物の重要度等も判断して定める」とあり、耐久性を考慮して設計する重要な部位といえる。

施工時にかぶり厚を検査する方法は、鉄筋と型枠面の間をスケールで計測する方法が用いられるが、施工後については実際の鉄筋が見えないため、電磁誘導法、電磁波反射法、放射線透過法等の高価な非破壊検査機器を使用する方法⁹⁾しかないのが現実である。

一方、コンクリートの施工時には、設計かぶりを確保するために、型枠と鉄筋間に設計かぶりを保つスペーサを設置する、すなわち、スペーサが適切に設置されていることが確認できることで、スペーサのサイズ以上のかぶり厚が確保されていることとなる。そこで、前項までの実験結果にもとづき、図 5-8 に示すイメージのように RFID タグを埋設したスペーサをあらかじめ設置し、コンクリート表面からリーダーライタで読み取りを確認することで、簡単にかぶり厚を検査するシステムについて開発を進めた。本システムは、スペーササイズを書き込んだ RFID タグをスペーサに埋設し、通常のスぺーサと同様に構造物表面に一番近い位置の鉄筋に設置し、構造物表面からスペーサの有無を無線で確認するシステムである。埋設されたスペーサの有無とそのサイズが無線で確認することで、表面にスペーサが突出していなければ確実にスペーササイズ以上のかぶり厚が確保していることが確認できる。

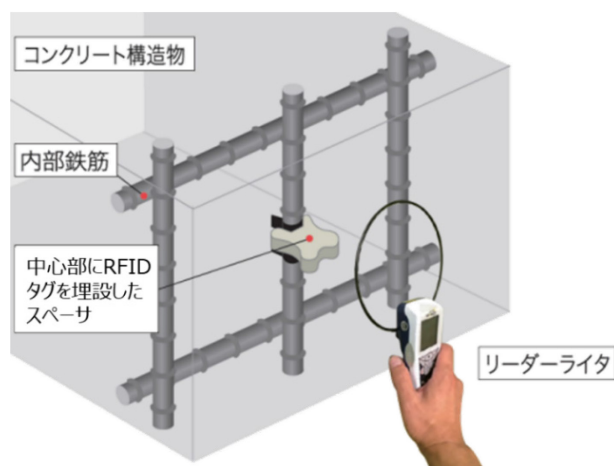


図 5-8 RFID タグを埋設したモルタルスペーサでかぶりを検査するイメージ

具体的には、図 5-9 のように適切な方向でモルタルスペーサが設置されていれば、リーダーライタで RFID タグを読み取ることが可能となり正常と判定され、図 5-10 のようにモルタルスペーサが 30° 以上傾いて設置されると、埋設された RFID タグを読み取ることができないため、異常と判定することとなる。

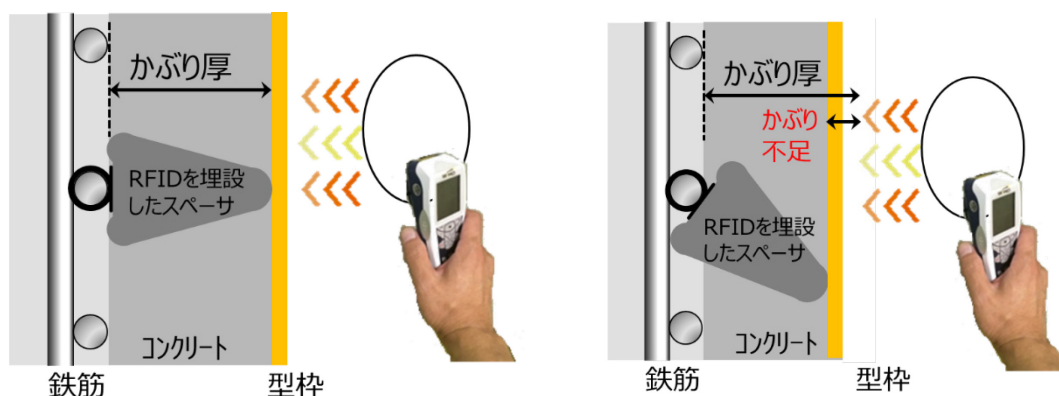


図 5-9 適切にスペーサを設置（正常） 図 5-10 スペーサが傾いて設置（異常）

5.3.1 かぶり厚検査用ソフトウェアの検討

RFID を埋設したモルタルスペーサ設置後の検査は、スペーサ設置位置のコンクリート表面から 30mm 以内にリーダーライタのアンテナをかざし電磁波を付与し、スペーサ内部の RFID タグを読み取ることができると、図 5-11（検査結果）に示すとおり RFID タグに記録されたスペーササイズを表示するシステムとした。

検査結果は検査した日時とともに、任意のコメントをリーダーライタから入力し、スペーサ内部の RFID タグの空きメモリに記録することができる。検査結果は 4 回分の検査履歴を記録する仕様として、検査結果のトレーサビリティを確保できる仕様とした。



図 5-11 かぶり厚検査システムのソフトウェア画面

5.4 RFID タグを埋設したスぺーサのかぶり厚検査システム以外の活用方法

RFID タグを埋設したモルタルスぺーサは、当然であるが、一般的な RFID タグの利用方法と同様に情報の記録や読み取りに各種活用方法が考えられる。

5.4.1 コンクリート製品製造・施工情報管理システム

工場で製造されるプレキャスト製品は、複数の工場から出荷される現場打ちコンクリートと比較して、材料や製造に関わる諸情報を管理しやすい。また、製品単位で品質管理が行われるため、品質情報の記録・管理が極めて重要である。

このアプリケーションは、プレキャスト製品に関わる各種の情報を RFID タグを埋設したモルタルスぺーサのメモリや個体識別 ID に紐づけてクラウドサーバーで管理するアプリケーションである。

図 5-12 に示すとおり i コンスぺーサのメモリには、コンクリートの品質情報や鉄筋、PC 鋼線等の情報に加え、製品の検査情報、出荷、現場受け入れ日時等の物流に関わる情報まで網羅して保存できる。

製品登録	その他情報
ID: e000000000000000	鉄筋メーカー: A製鋼
基準強度: 1111 N/mm ²	鉄筋材質: SD345
打設日: 2018.07.23	PC鋼材メーカー: A製鉄
スランプ: 222 cm	PC鋼材種別: SWPR1AN
空気量: 33%	設計日: 20190813
温度: 44℃	荷重: 111.1 N/mm
強度: 5555 N/mm ²	F3: 初期化
F1: 確定	F3: 確定
F2: MENU	F2: MENU

図 5-12 コンクリート製品の情報登録画面

また、個体識別 ID や製造番号のように、RFID タグを埋設したモルタルスぺーサに記録されたユニークな情報とサーバーやクラウドに保存された情報を紐づけて連携させることで、写真や CAD データのように大容量なデータを簡単に参照可能となる。リーダーライタと連携したタブレット PC 等を活用することで、製品の情報だけでなく、施工時の図面確認や、現場確認写真を連携して保存することもシステム構築を行うことで実現できる。

5.4.2 目視点検結果管理システムへの活用

2014 年に法制度化された重要構造物の点検要領では、各構造物に近接し目視点検を行うことを基本としている。従って、実際に構造物に接近して検査したこ

とを証明できることが望ましい。図 5-12 に一例を示すとおり、RFID タグを埋設したスぺーサにひび割れの有無やひび割れ幅、うき、剥落等、目視点検の結果と同時に点検日時、点検実施者の氏名等をメモリに記録することで、実際に近接した証明することに加え、構造物自身に点検履歴を保存することが可能となる。

点検記録	点検記録	点検履歴	点検履歴
ID: e00000000000000000	ID: e00000000000000000	ID: e00000000000000000	ID: e00000000000000000
点検者: 12345	点検者: 12345	点検日時:	点検日時:
ひび割れ:	ひび割れ: 0.2mm以下	1. 15年06月23日 14:30	2015年06月23日 14:30
なし 小 中 大	浮き:	2. 15年06月24日 19:30	点検者: 12345
	無し 有り	3. 15年06月23日 14:30	鉄筋露出: 無
		4. 15年06月23日 14:30	エポキシ: 有
		5. 15年06月23日 14:30	ボップアウト: 有
		6.	すりへり: 無
			漏水: 有

図 5-12 点検情報の記録画面

5.5 RFID タグを埋設したモルタルスぺーサの活用に関するまとめ

スぺーサに RFID タグを埋設し、かぶり厚検査システムへの適用性を検討するにあたり、スぺーサとしての強度性状や、コンクリート試験体に RFID タグを埋設した際の各種通信性能を確認した結果、以下の結論を得た。

- (1) RFID タグを埋設したモルタルスぺーサは、市販のモルタルスぺーサと強度性状の差異はなく、設置する構造物の安全性を損ねることはない。
- (2) モルタルスぺーサは通常のコンクリート工事で多数設置されることから、その中のいくつかを RFID タグを埋設したモルタルスぺーサに変更するだけで、低コストで RFID の各種機能を活用することが可能となり、設置工数も増加しない。
- (3) RFID を埋設したモルタルスぺーサは、適切に設置することで、従来の RFID タグを投げ込む方式のように、読み取れない RFID タグは生じない。
- (4) RFID タグを埋設したスぺーサを設置して検査する場合、傾きが 0~15° までの範囲で適切に施工された場合のみ RFID タグを読み取ることができ、適切にかぶり厚が確保されたと判断できる。
- (5) 本システムにおいて、RFID タグを読み取ることができない場合、RFID タグを埋設したスぺーサが 30° 以上傾いて施工されている可能性が生じるため、かぶり厚が適切に確保されていない推察できる。その結果が、検査時に許容できない数量の場合、別途、非破壊検査等で詳細調査を行うことが望ましい。
- (6) RFID タグを埋設するスぺーサのサイズはスぺーサ中心部に RFID タグを設置することを条件とすれば、最大 140mm 厚のスぺーサまで適用可能である。

- (7) RFID タグを埋設したモルタルスペースの活用方法として、かぶり厚検査システムだけでなく、目視点検結果の管理システム、構造物の各種履歴情報の管理等、様々な活用方法が期待できる。

5.6 RFID の反射電波強度を応用した検討

RFID は、リーダーライタから発信される電波を受信し、リーダーライタに個体識別 ID やメモリ内のデータを送信する機能を有しており、RFID の通信特性を活用したアプリケーションも提案されている¹⁰⁾。中でも、反射電波強度 (Received Signal Strength Indicator (RSSI)) の強弱を計測することで、RFID の位置を特定するアプリケーションとして、RFID を取り付けたモノの紛失物の探索や、簡易的な GPS のように人の位置を特定する活用事例も見られる。反射電波強度は物理的な通信距離の変化との相関だけでなく、RFID タグの周囲の環境変化にも相応に反応を示す。周囲の環境とは通信周波数の波長内における物質の影響を指し、物質の誘電率が変化することで、通信に対する影響を与えることが知られている。

すなわち、RFID タグをコンクリートに埋設した場合、RFID タグの周囲に存在するコンクリートの誘電率が変化させる要因があれば、それに呼応することが推察され、水分量の変化によるコンクリートの誘電率変化によって、電波強度が変化すると想定し、コンクリートの物性変化を非破壊的にセンシングできると考えられる。更に水分は電波エネルギーを吸収する特性を持っていることから、物質内部の水分変化を把握できるのではないかと想定した。すなわち、コンクリート硬化過程で変動 (減少) していく自由水分量の変化を受信電波強度の変化から把握できると予想し本検討にて確認した。

5.6.1 コンクリート硬化状態の把握方法の検討

コンクリートの硬化状態を把握するためには、適切な材齢で採取した供試体の強度試験を実施することが一般的であるが、硬化時に計測した表面温度の積算値より型枠脱型時期を判定する手法も一部で活用されている¹¹⁾。その他の方法として、硬化に必要な水分がセメントとの水和反応で消費されることから、硬化に伴う自由水の減少を把握することができれば、供試体の採取を行わずに実部材の硬化状態を把握できると考えられる。一方、電子レンジのマイクロ波加熱の原理に代表されるように、水は電波からエネルギーを吸収し発熱することが知られている。本検討においては、物流等で利用されているマイクロ波を利用する RFID タグをコンクリートに埋設して、コンクリートの強度変化と水分減少に伴う RFID の受信電波強度を計測することで、コンクリートの硬化状態を推

定する手法を検討した。

5.6.2 コンクリートに埋設した RFID タグの電波強度

RFID には前述したようにいくつかの規格が存在するが、定量的な通信性能を把握するため、本実験においては RSSI 値の電波強度を計測できる 920MHz (UHF 帯) を用いた。UHF 帯の RFID タグは第 4 章でも述べているとおり、水分の影響を受けやすいことから、コンクリート中における電界強度は比誘電率より導電率の変化によって差が生じる。図 5-13 にはコンクリートが乾燥している時の内部の電界強度を示し、図 5-14 には湿潤時の電界強度を示す。この解析結果は 920MHz 帯のコンクリート内部の電界強度がコンクリート表面とリーダーライタのアンテナ間の距離 (G) が変化することによるコンクリート内部の電界強度変化を示したものであるが、どの位置においても湿潤時に比べ乾燥時は 2~3 倍程度増加する結果である¹²⁾。この結果から UHF 帯の通信周波数は水分変化に伴う電波強度の変化が顕著だと想定した。

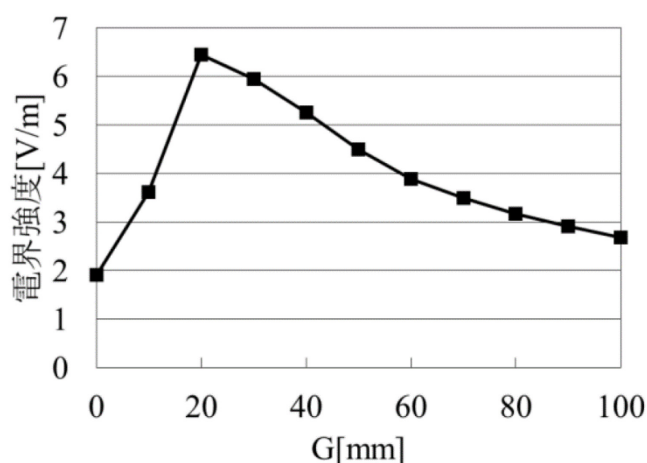


図 5-13 乾燥したコンクリート内部の電界強度分布

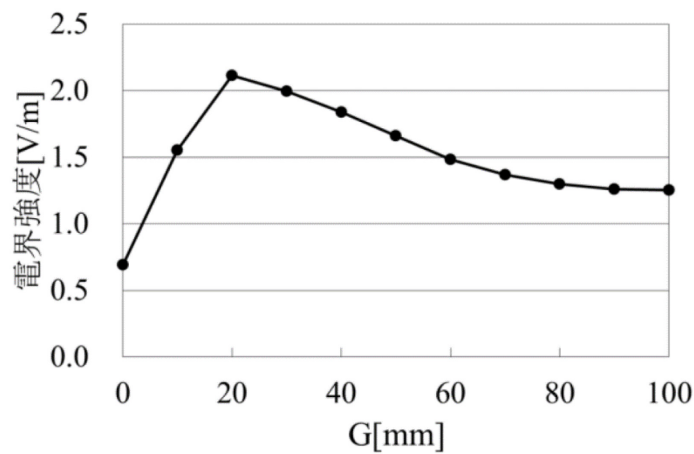


図 5-14 湿潤したコンクリート内部の電界強度分布

なお、電波強度である RSSI 値は式 5-1 で算出され、RFID タグとリーダーライタ間の通信距離とほぼ比例して変化する。

$$RSSI(dB) = 10 \log_{10} \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad \cdot \cdot \cdot \text{式 5-1}$$

ここに、 P_{out} : 出力電力、 P_{in} : 入力電力

電波強度を計測する試験体は、図 5-15 に示す $500 \times 500 \times 100\text{mm}$ の型枠を用意し、打設面よりかぶり 40mm の位置にモルタルスペーサを用い RFID タグを設置した。リーダーライタを RFID の直上に配置し、コンクリート打設前にリーダーライタで自由空間時の RFID の反射電波強度を計測したうえで、コンクリートを打設し、時間経過に伴い定期的に受信電波強度 (RSSI) を計測した。リーダーライタの計測条件として、コンクリート表面から 30mm (RFID タグから 70mm) と 90mm (RFID タグから 130mm) の位置から計測を行った。なお、試験体を製作する際に供試体を採取し、材齢 1 日～28 日までの圧縮強度を適時測定した。使用したコンクリートは、表 5-7 に示すとおり、普通ポルトランドセメントを用い水セメント比 40%、45%、50% の 3 水準の配合を用意した。埋設した RFID タグと通信を行うリーダーライタは電波出力 1W のものを使用した。

表 5-7 試験体のコンクリート配合

水準名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤添加率(C×%)			
			W	C	S	G2013	G1305	AD	SP	AE	DAE
40	40	46	175	438	758	457	457	-	0.6	0.002	0.008
45	45	47	175	389	793	460	460	-	0.6	0.002	0.012
50	50	48	180	360	815	454	454	0.6	-	0.004	0.01

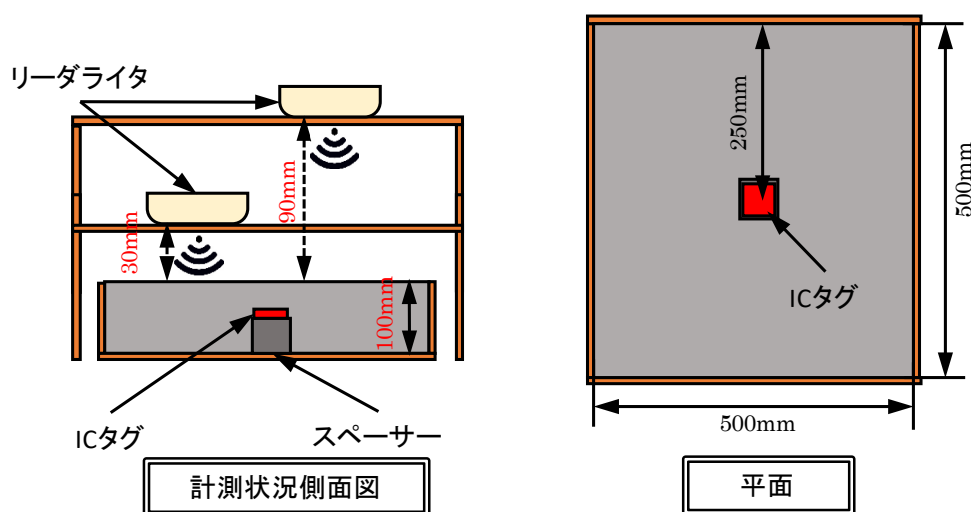


図 5-15 試験体と電波強度計測方法の概要

5.6.3 電波強度の計測結果と考察

図 5-16, 図 5-17, 図 5-18 に各配合における圧縮強度の変化とその際に計測した RSSI の推移を示す。供試体の強度は養生条件問わず材齢に伴い強度増進が見られる。RSSI は、打設前は計測距離 30mm で約-42~-43dB, 90mm で-45dB 程度を示し、打設直後に大きく低下し、材齢の進行に伴い微増していった。また、その傾向は水セメント比 40% の 90mm は、材齢に伴い RSSI が直線的な増加傾向を示し、水セメント比が高くなるほど、その傾向は緩やかな結果を示しているものの、水セメント比の差異を明確に判断することは難しい結果であった。

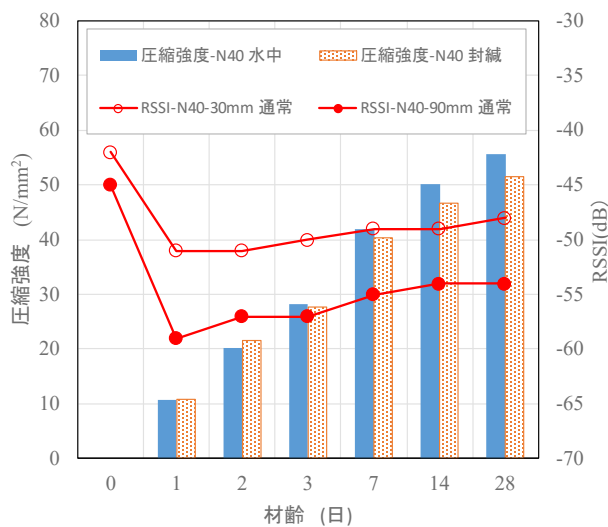


図 5-16 RSSI と圧縮強度の推移(W/C:40)

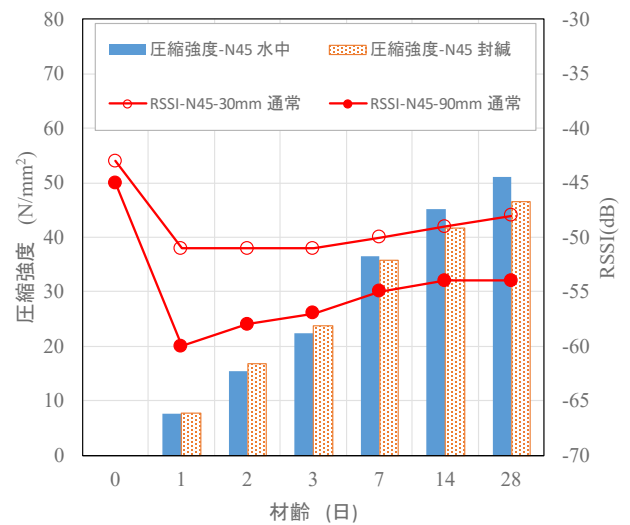


図 5-17 RSSI と圧縮強度の推移(W/C:45)

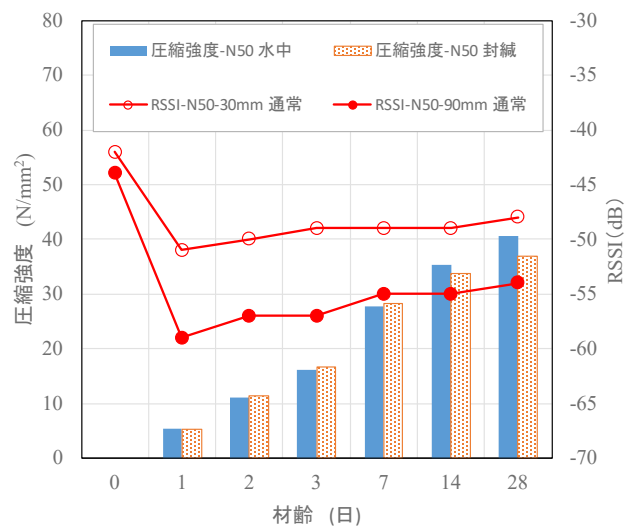


図 5-18 RSSI と圧縮強度の推移 (W/C:50)

RSSI は式 5.1 に示すとおり，入力電力と出力電力の比の対数を簡易的に表現するためにデシベル値を用いている。

すなわち，デシベル値は対数を簡易的に表現していることから，実際の電力比の実数に換算すると変化傾向が明確になる可能性がある。そこで，電力比に換算して再評価した。再評価は式 5.1 から，RSSI 値より電力比 (P_{out}/P_{in}) を算出した。

材齢の進行に伴い変化する電力比を、コンクリート打設前を 100 として除した百分率値を復活率と定義した。更に各水準の 28 日材齢の圧縮強度を 100 としたときの強度発現率を算出し、電力比の復活率との関係を図 5-19 および図 5-20 に示した。なお、養生方法の違いについては、明確な差を確認できない。

強度が発現するほど電力費の復活率は上昇し、材齢 1 日を基準にすると通信距離 30mm では 12～15%の上昇を示した。通信距離 90mm においても 7～10%程度上昇した。なお、30mm では水セメント比 50 は強度発現率 40%に至るまで電力比の復活率も上昇することに対し、水セメント比 40 と 45 は強度発現率 40%付近から電力比の復活率が上昇傾向を示した。90mm においては、水セメント比 40 と 45 がほぼ同様の挙動で直線的な比例関係を示し、水セメント比 50 のみ強度発現率 70%付近から緩やかな上昇傾向に転じた。

これらの結果より、RFID を埋設して RSSI の経時変化を計測し、電力比の復活率を把握することで、凡その強度発現率を把握出来ると考えられる。特に RFID のかぶり 40mm においては、コンクリート表面から 90mm の位置で RSSI を計測することで、高い精度で強度発現率の推定が可能である。また、30mm と 90mm の結果から考察すると、水セメント比より単位水量の影響が大きい可能性が推察されることから、単位水量との関係についても、今後の検討が必要である。

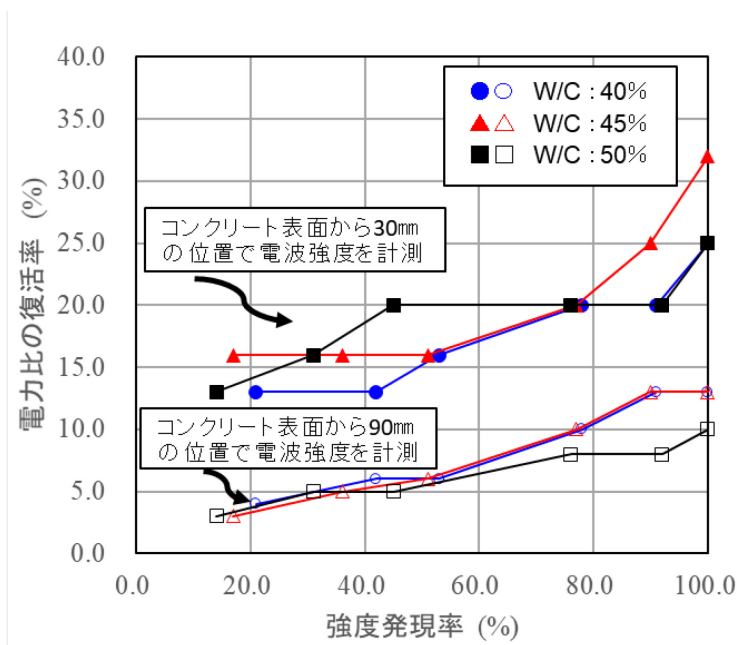


図 5-19 電力比の復活率と強度発現率の関係（封緘養生）

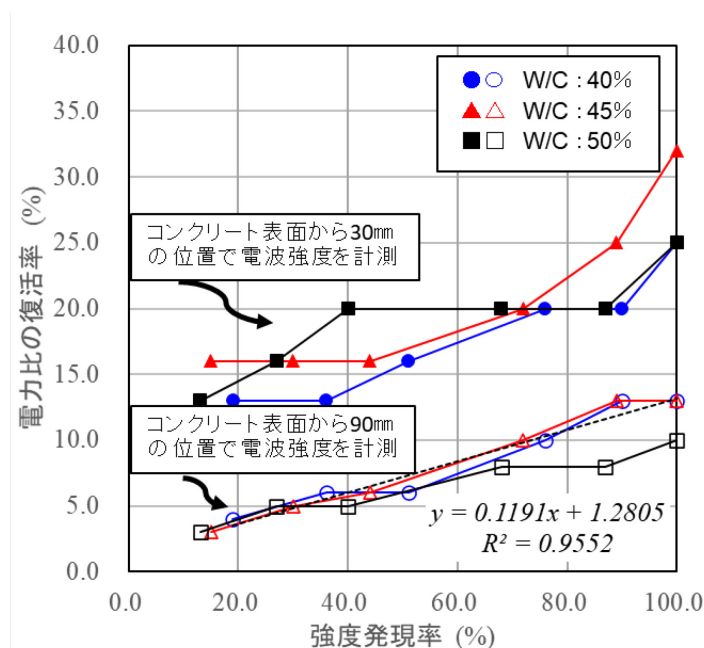


図 5-20 電力比の復活率と強度発現率の関係（水中養生）

5.7 第 5 章のまとめ

本章では RFID 技術をセンサインターフェース以外にコンクリート分野にて適用するための応用事例を検討した。その一つとしてモルタルスパーサに RFID タグを埋設して、かぶり厚の検査システムを構築し、RFID タグを埋設する際の安全性や施工性およびかぶり厚検査の妥当性を検証した。以下に結果をまとめる。

- (1) RFID タグを埋設したモルタルスパーサは、市販のモルタルスパーサと強度性状の差異はなく、設置する構造物の安全性を損ねることはない。
- (2) モルタルスパーサは通常のコングリート工事で多数設置されることから、その中のいくつかを RFID タグを埋設したモルタルスパーサに変更するだけで、低コストで RFID の各種機能を活用することが可能となり、設置工数も増加しない。
- (3) RFID を埋設したモルタルスパーサは、適切に設置することで、従来の RFID タグを投げ込む方式のように、読み取れない RFID タグは生じない。
- (4) RFID タグを埋設したスパーサを設置して検査する場合、傾きが 0~15° までの範囲で適切に施工された場合のみ RFID タグを読み取ることができ、適切にかぶり厚が確保されたと判断できる。
- (5) 本システムにおいて、RFID タグを読み取ることができない場合、RFID タ

グを埋設したスペーサが 30° 以上傾いて施工されている可能性が生じるため、かぶり厚が適切に確保されていない推察できる。その結果が、検査時に許容できない数量の場合、別途、非破壊検査等で詳細調査を行うことが望ましい。

また、将来的な RFID タグの使用方法としてコンクリートの強度発現を推定する手法を RFID タグの反射電波強度を活用し検討した。その結果を以下にまとめる。

- (1) RFID を埋設して RSSI の経時変化を計測し、電力比の復活率を把握することで、凡その強度発現率を把握出来ると考えられる。
- (2) RFID のかぶり 40mm においては、コンクリート表面から 90mm の位置で RSSI を計測することで、高い精度で強度発現率の推定が可能である。
- (3) RFID タグの反射電波強度に与える影響は水セメント比より単位水量の影響が寄与すると推察されることから、単位水量との関係についても、今後の検討が必要である。

第5章の参考文献

- 1) 江里口玲, 杉山央, 角倉英明, 大久保孝昭: コンクリートのトレーサビリティ確保のための IC タグの活用技術: コンクリート舗装施工実験, 日本建築学会技術報告集, 第 18 巻, 第 40 号, pp.829-834, 2012.10
- 2) <https://www.tobishima.co.jp/technology/civil/dam/ic/ic01.html>, IC タグを用いた骨材混入防止・運行管理システム, 飛島建設株式会社ホームページ
- 3) 野村義清, 半田雅俊, 香月泰樹, 木村哲, 近藤操可: RFID タグを利用した建設現場管理システムの開発, 戸田建設技術研究報告, 第 31 号, pp.1-6
- 4) 小川彰一, 金田由久, 長岡真二, 佐藤達三: センサ機能付き RFID の構造物維持管理への応用, コンクリート構造物の非破壊検査論文集: 日本非破壊検査協会, Vol.2, pp.209-214, 2006
- 5) 杉山央, 大久保孝昭, 中島史郎: コンクリート中に埋め込んだ各種 IC タグの通信性能に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第 15 巻, 第 29 号, pp.9-14, 2009.2
- 6) 杉山央, 角倉英明, 江里口玲: IC タグを活用したコンクリートのトレーサビリティ確保技術ーコンクリート中に投入する IC タグの必要量算出手法ー, 日本建築学会構造系論文集, 第 76 巻, 第 688 号, pp.1045-1063, 2013.6
- 7) 大久保孝昭, 藤本郷史, 吉峰侑吾, 杉山央, 角倉英明, 古賀純子: コンクリートのトレーサビリティ確保のための IC タグの活用技術ー製造時に投入する IC タグの評価ー, 日本建築学会技術報告集, 第 18 巻, 第 38 号, pp.31-36, 2012.21)
- 8) 基本建築基準法関係法令集 2018 年版, 国土交通省住宅局建築指導課・建築技術研究会, 2017.11.18
- 9) 土木学会, 2012 年制定コンクリート標準示方書 施工編, pp.213
- 10) 椎尾一郎: RFID を利用したユーザ位置検出システム, 情報処理学会研究会報告 00-HI-88, pp.45-50, 2000.
- 11) 基本建築基準法関係法令集 2018 年版, 国土交通省住宅局建築指導課・建築技術研究会, 2017.11.18
- 12) 間山京将, 岡野好伸, 荻野哲, 江里口玲, UHF-RFID 技術を用いたコンクリートへの高効率伝送法の検討, 平成 27 年電気学会全国大会講演論文集, pp.1-022-023, 2015

第6章 総括

6.1 本研究の結論

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ぺーサに 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ぺーサについては、その通信指向性を利用した簡易的な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かぶり検査手法を構築した。

また、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。

6.2 本研究の将来に向けた普及への期待と展望

鉄筋腐食センサの開発の歴史は、コンクリート構造物のライフサイクルに比べると、まだまだ短く、新技術に分類される。本報で取り上げた各種の課題を解決するとともに、耐久性をはじめとする信頼性や、適用効果を認知・獲得するためにもセンサを実際に使ってみなければ、具体的な適用効果や未知の課題が見えてこない。

現時点ではセンサだけで維持管理を行えるレベルではなく、今後も多くの研究や実証が求められる。よくわからないから使わないのではなく、まずは使ってみることからはじめ、従来の破壊検査や、信頼性の高い非破壊検査と組合せてその適用効果を確認してほしいと期待する。

既に本研究で実用化したシステムは国内では100を超える物件への採用実績があり、センサ数では2000近い数が使われてきた。それらは専用のクラウドシステムで計測データの管理を行っており、現場の写真や設置位置の情報とともに情報の蓄積と共有を行っている。

今後は、すでに設置している構造物を定期的に計測することで、システムの更なる信頼性の向上と機能改良や更なる耐久性の検証を継続し、実際に予防保全型維持管理への適用効果を確認していきたいと考えている。

加えて、RFID技術はまだまだ、アイデア次第で様々な適用可能性を秘めている。今後も診断システムとしての発展はもちろんのこと、施工管理や品質確認において、新たな活用方法の提案や新しいデバイス開発に向けて取り組みたいと考えている。

【謝 辞】

本論文をまとめるにあたり、宇都宮大学教授 藤原浩已先生には、終始ご懇意なるご教示を賜りました。ここに心より感謝申し上げます。藤原先生に多くの叱咤激励とともに、本研究の取りまとめにあたり貴重なご助言を賜りました。深く御礼申し上げます。

本研究は、2000年頃に提唱されたユビキタス技術の代表でもあるRFID技術に、高い付加価値を付けてコンクリートの維持管理技術に適用することを検討した内容から端を発しています。当時、RFID技術をコンクリートの診断技術に適用するというコンセプトは世界で初の試みであり、故 小川彰一博士（当時太平洋セメント（株）中央研究所）が、基礎的な検討と診断技術としての構想を提案しました。本研究ではその構想をもとに実際の構造物に適用するための実用化を目指して行った研究であり、故 小川彰一博士の構想がなければ実現することはなかったと思います。心より感謝申し上げます。

本研究を進めるにあたっては、多くの皆様にご協力いただきました。特に本研究の初期に携わっていただいた、太平洋セメント（株）佐藤達三氏、中西博氏、故 大竹純一郎氏、（株）太平洋コンサルタント 営業統括部 高橋英孝氏には本技術の実用化をするための基本部分について多大なるご支援をいただきました。

耐久性や実用性能の確認においては、（株）太平洋コンサルタント中部営業所長 宮崎昇氏、日本ヒューム（株）技術本部部長 早野博幸博士、太平洋セメント（株）三谷裕二博士 井坂幸俊氏、工藤正智氏には多くの現場実験を支援いただくとともに、実用的なシステムにするための品質試験や製造方法の確立、耐久性の確認等、様々な検証において協力いただきました。

全国各地における現場検証においては、太平洋セメント（株）セメント営業本部営業部技術グループ、営業推進グループ、各支店の技術部の皆様はじめ、（株）構研エンジニアリングの皆様、（株）ナトリ 執行役員 原泰氏にも多くの支援をいただきました。

加えて、長岡技術科学大学工学部 電気電子情報系 岡元智一郎准教授をはじめ実務訓練にて本研究のサポートをしてくださった学生諸氏の皆様、センサの性能検証においては溶液試験の提案と実行をいただいた、ショーボンド建設（当時（株）ナカボーテック）篠田吉央博士、（株）ナカボーテック 若松徹氏、板屋隼人氏にも感謝申し上げます。

また、本研究を取り纏めるにあたり、宇都宮大学を推薦いただいた（株）太平洋コンサルタント代表取締役社長 石川雄康博士、入学を支援いただきご配慮と激励を賜りました、太平洋セメント（株）常務執行役員 岡村隆吉博士、執行役員中央研究所長 高野博幸博士、日本ヒューム（株）執行役員技術本部長 田中

敏嗣博士，太平洋セメント（株）知的財産部長 谷村充博士には深甚の謝意を申し上げます。

すべての方のお名前を紹介できませんでしたが，他にも多くの方々のご協力により本論文を完成させることが出来ました。厚く御礼申し上げます。