

# 論文 鉄筋コンクリート部材内に埋設されたRFIDタグとの通信性能を指標とした非破壊な鉄筋腐食検知

藤本 郷史<sup>\*1</sup>・平原 悠生<sup>\*2</sup>・大久保 孝昭<sup>\*3</sup>

**要旨:** 鉄筋コンクリート部材内の鉄筋の腐食診断技術に対する社会的要請は大きい。本報では、RC 部材に RFID タグを埋設しておき、その通信性能を定期的に測定することで、埋設位置近傍の鉄筋腐食を非破壊に検知できることを見出した。さらに、著者らの提案する“通信成功率”を指標とすることで、腐食の有無だけでなく腐食の進行(腐食量の変化)についても検知できる可能性を見出した。また、腐食検知に用いる「鉄筋腐食による通信性能の向上」現象は、鉄筋の腐食による導体部分の減少が、リーダライタから RFID タグへの電力供給量増加をもたらすことが主要因であることを、磁界強度測定を通じて示した。

**キーワード:** 鉄筋腐食, 非破壊, RFID (Radio Frequency Identification), 定期検査, モニタリング, 診断

## 1. はじめに

鉄筋腐食は、コンクリート構造物における重大な劣化現象の一つである。したがって、鉄筋の健全性を簡便に確認・評価するための鉄筋腐食診断には大きな社会的ニーズがある。このような認識のもと、鉄筋の腐食診断技術(ex.ハツリ調査,自然電位法 etc.)が数多く開発・実用されてきた。これらの手法の多くは、鉄筋コンクリート部材(以後、RC 部材と表記)の一部をはつり、鉄筋にケーブル等を接続して行うものであり、完全に非破壊な方法による鉄筋腐食検知技術は、著者らの知る限り、少ない<sup>1)</sup>。他方で、腐食センサを RC 部材内に埋設する技術も近年、提案例がみられる<sup>2)</sup>。このようなセンサ埋設法は部材の“はつり”を伴わないという利点がある。本報では、同様のアプローチを採るが、腐食検知センサ部を伴わない RFID タグのみを用いた腐食検知技術を提案する。具体的には、以下の条件を満たす新しい腐食検知技術の開発を目標とし、その基盤となる知見の検証を目的とした。

- 1) コンクリートのはつりを伴わない非破壊な方法で、鉄筋腐食を検知できること
- 2) 比較的安価な(数十~数百円<sup>例えは<sup>3)</sup></sup>) HF 帯 RFID タグのみを部材内に埋設し、鉄筋腐食を検知できること

## 2. 本報の考え方と位置づけ

著者らはこれまでに、HF 帯 RFID タグ・センサを RC 部材に埋設した場合の通信性能評価法を提案し、RC 部材に埋設された RFID タグと RC 部材外部のリーダライタ(以後、RW と表記)との間の通信性能に対して、導体としての鉄筋の存在が負の影響を及ぼすことを実験的に明らかにしてきた<sup>4)</sup>。“鉄筋の腐食”現象を、導体である鉄

が酸化され不導体へと変化する現象と捉えると、上述の成果は鉄筋腐食検知の可能性を示唆するものである。なぜなら、鉄筋が腐食して導体部分が減少すれば、RFID タグ-RW 間の通信性能が向上すると予想でき、この変化を捉えることで腐食が検知できると期待できるからである。本報は、このような考え方に基づいて、図-1に示すような実施手順を想定した鉄筋腐食検知技術の開発を目指すものと位置づけられる。

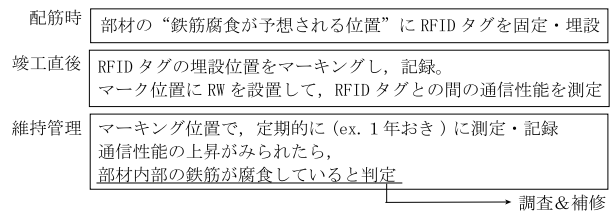


図-1 本報で想定した鉄筋腐食検知の手順 (概念図)

## 3. 鉄筋の腐食に伴う RF 通信性能の変化検出実験

### 3.1 実験の概要

RFID タグを RC 部材に埋設する場合、導体(i.e. 鉄筋, 結束線)の通信性能への影響が大きいことがこれまでの研究<sup>4)</sup>から明らかとなっている。そこで、本報ではまず、鉄筋単体の試験体を対象にして実験を行い、促進腐食試験を行いながら、腐食の進行に伴う RFID タグ-RW 間の通信性能の変化を測定した。これによって、腐食の度合いに応じた RF 通信性能の変化の有無を検討し、腐食検知が可能かどうか埋設想定位置ごとに検討した。

次に、この腐食した鉄筋を用いた鉄筋コンクリート試験体(以後、RC 試験体と表記)を作製し、腐食していない

\*1 広島大学 大学院工学研究院社会環境空間部門 助教 博士(工学) (正会員)

\*2 広島大学 大学院工学研究科建築学専攻 大学院生 (非会員)

\*3 広島大学 大学院工学研究院社会環境空間部門 教授 工博 (正会員)

(通常の)鉄筋を用いた RC 試験体の通信性能試験結果と比較した。これによって、RC 部材中であっても鉄筋単体の場合と同様に、鉄筋腐食がある場合の方が、腐食が無い場合より通信性能が高くなることを検証した。

腐食の進行に伴うひび割れ発生などが通信性能の向上に寄与することも考えられる。非破壊な腐食検知を目指す立場からは、このようなひび割れが発生しない場合でも腐食を検知できるのが望ましい。そこで、上述のように予め鉄筋を腐食させてからコンクリートを打ち込む実験方法を採用することで、可能な範囲で腐食のみの検知性能を評価するよう実験計画を立案した。

### 3.2 実験の方法

#### (1) 試験体の概要および測定方法

図-2に試験体の概要を示す。鉄筋コンクリート壁部材への RFID タグ埋設を想定し、シングル配筋とダブル配筋の場合を検討した。腐食鉄筋を用いた RC 試験体は、促進腐食試験後の鉄筋試験体(RB)に対して型枠を施工し、コンクリートを打設する方法によって作製した。

図-3に測定方法を示す。RW はコンクリート表面での定期検査を想定して、測定面  $S_1$  上、アンテナ中心が直線  $L_1$  上となるように設置し、制御用 PC によって通信性能を計測した。導体の影響を避けるために RFID タグを木製の棒に取り付け、測定直線  $L_1$  (または貫通孔中心線) 上を動かして、通信距離  $d_{RW}$  を 0mm から順に大きくして RFID タグの埋設想定位置ごとに計測した。鉄筋格子との相対位置によって通信性能への影響が異なることが判っているので、図-2右下に示す“交差点付近”“格子中心”の2直線上を測定点とした。RFID タグの RW に対する相対的な“向き”によって通信性能は異なる。そこで、RFID タグの位置・方向は埋設時に制御できると仮定し、通信性能が最大となる向きに RFID タグを設置した。

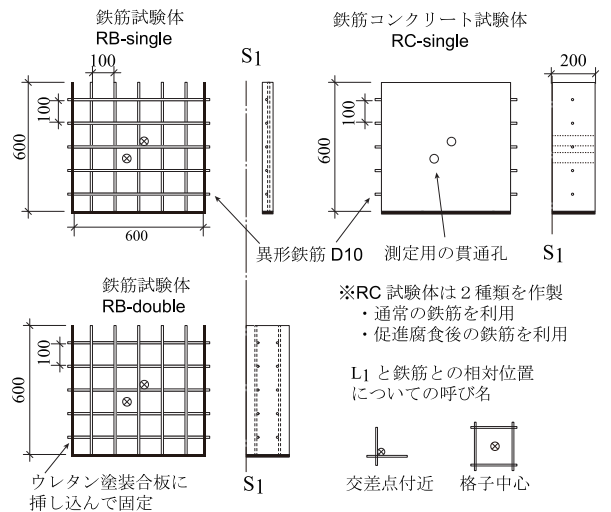
RC 試験体の測定では、測定に用いない貫通孔を同一調合のコンクリート棒で塞いだ。なお、RC 試験体の貫通孔内で RW-RFID タグ間にコンクリートが充填されていない点、コンクリート棒周囲に小さな隙間がある点については、コンクリートが充填された場合と通信成功率や磁界強度にほとんど差異を生じず、影響が無視できることを予備試験により確認してある。測定は、鉄筋試験体については 20°C の RC 建築物室内で、RC 試験体については、S 造建築物内で行った。RFID タグは全試験で同一のものを用いた。ただし、測定環境(屋内外、構造種別)や RFID タグの別(個体差やロットの違い)による影響が小さい(本報試験水準間の通信性能の差よりも十分小さい)ことを別途行った試験で確認してある。

#### (2) 使用材料およびコンクリートの調合

鉄筋は、異形鉄筋 D10(SD295)を用いた。全ての結束位置で結束線を2本用い、試験水準間で可能な限り同一の

結束状態となるよう施工に配慮した。表-1にコンクリートの計画調合表を示す。骨材には、広島県産砕石(粒形判定実積率 58.0%, 表乾密度 2.62g/cm<sup>3</sup>)、広島県産の石英斑岩と風化花崗岩の混合砕砂(容積比 1:1 混合, 粒形判定実積率 59.8%, 表乾密度 2.55 g/cm<sup>3</sup>)、セメントには普通ポルトランドセメント(比表面積 3170cm<sup>2</sup>/g, 密度 3.16g/cm<sup>3</sup>)を用いた。混和剤には、広島県内の実績を考慮してポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を用いた。

腐食した鉄筋は、コンクリートの打設によって多少なりとも還元される可能性がある。そこで、後述する RC 試験体の測定は、若材齢時(材齢 7 日)に設定した。なお、RF 通信性能に対するコンクリート材齢の影響は比較的小さいことが既報により確認されている<sup>5)</sup>。



凡例 S1: 打設後のコンクリート表面を想定した位置  
 ⊗: RFID センサ・タグを設置して計測を行う直線  $L_1$  の位置  
 (※ RC 試験体における貫通孔と鉄筋との相対位置が同一)

図-2 試験体の概要

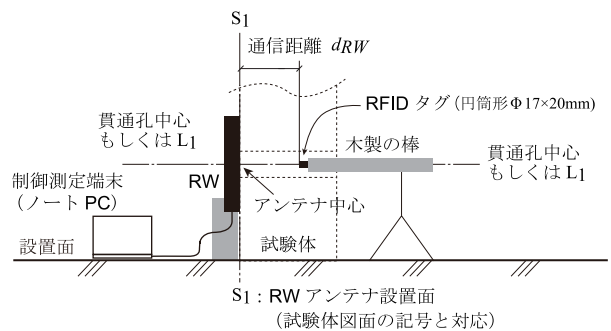


図-3 測定方法の概要

表-1 計画調合表

呼び強度	スランプ	空気量	水セメント比	細骨材率	単位水量	セメント	細骨材	粗骨材
			W/C	s/a	W	C	S	G
N/mm <sup>2</sup>	cm	%	%	%	kg/m <sup>3</sup>			
27	18.0	4.5	53	49.6	180	340	844	880

※ただし、高性能 AE 減水剤 C×0.7%

### (3) RFID タグーRW 間の通信性能の評価方法

本報では、著者らが既報<sup>4)</sup>で提案した“通信成功率”(式1参照)と呼ばれる指標を通信性能の評価に用いた。また、建設系 RFID 応用分野で用いられる通信性能指標である通信可能な最大距離(図-3,  $d_{RW}$ の最大値, 図-4のコマンド③まで実行可能な最大距離, ID読み取り可能距離に相当)も測定し、適用性を併せて検討した。図-4にRF通信の手順と本報の測定項目を示す。RF通信は複数のコマンドの往復によって実現されるが、鉄筋の存在や通信距離の増加によって通信が不安定になるほど、コマンドの実行が途中で途切れる可能性が確率的に高まる。したがって、コマンドがどの程度安定的に実行できるかを計量することで、通信性能(通信の可否や安定性)を評価することができる。本報ではこの考え方を基に、図-4に示すコマンドの実行安定性を計量して通信性能を評価した。すなわち、各測定ごとに通信を  $N_R=100$  回試行し、 $b$ の論理積  $b_p \wedge b_f \wedge b_k \wedge b_r \wedge b_{de}$ の集合  $B$ について、ポーリングからタグの解放までの全コマンドが成功した元の集合を  $C_{all} = \{c_{all} \in B | c_{all} = \text{true}\}$ として、式(1)によって評価した。ただし、 $\text{card } X$ とは集合  $X$ の元の個数である。

$$\text{通信成功率}^{4)} \quad R_{all} = \frac{\text{card } C_{all}}{N_R} \times 100 \quad (\%) \quad \text{式(1)}$$

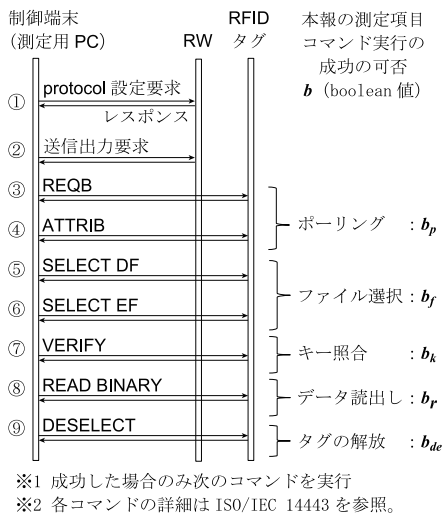


図-4 通信の手順と本報での測定項目

### (4) 鉄筋の促進腐食の方法

本報では鋼材(鉄筋)単体での促進腐食を第一段階として行うので、金属材料分野での例を参考に希塩酸塗布法による促進腐食を採用し、以下の手順で実施した。

- 1) 通信性能を計測する。
- 2) 鉄筋試験体に刷毛を用いて 10%希塩酸を塗布
- 3) 鉄筋試験体が次の促進腐食日(表-2参照)となるまで、気温 20℃, 相対湿度 60%の屋内に放置。
- 4) 1)に戻って繰り返す。

この方法は、コンクリート材料分野で一般的な鉄筋の塩水噴霧法に比べると、実際の RC 部材における腐食から乖離する欠点があるが、一方で、腐食が均質に発生するため腐食状態を制御しやすく、「腐食(導体部分の欠損)の検知可能性を検証する」という本報の目的には適するものと考えている。ただし、今後の研究展開にあたっては、実際の構造物における腐食要因・腐食形態を考慮した更なる実験的検証も必要と認識している。

### (5) 腐食量の校正

図-5に腐食量校正用の異形鉄筋サンプルの概要を示す。この鉄筋サンプル(腐食日数ごとに 3 本)を鉄筋試験体と同一の方法で促進腐食し、所定の促進腐食日数(表-2参照)経過後に質量を計測した。鉄筋単位表面積あたりの腐食生成物による質量増分  $r_{dw}$  (mg/cm<sup>2</sup>)を式(2)により算定し、3 本の平均値をとって、その促進腐食日数における腐食量の指標とした。図-6に算定結果を示す。以後の検討では、これを用いて促進腐食日数を腐食量指標  $r_{dw}$  に換算した。この評価法では質量増加の内訳は明確でない。本報では、“腐食を検知できるか確認する”ことを目的とした点、均一な全面腐食となる実験方法に対して、鉄筋の黒皮部は 0.5wt% 程度<sup>7)</sup>と小さい点、を考慮して、この簡便な指標を用いても結論に大きな差異を生じないと判断した。なお、RC 部材における鉄筋腐食量測定では、クエン酸二アンモニウム溶液で除錆し腐食減量を評価する方法が一般的であるが、本報のように鋼材単体の促進腐食試験の場合、腐食生成物による質量増分を評価する方法も金属材料分野で一般的である(例えば<sup>6)</sup>)。

$$r_{dw} = \frac{M_1 - \frac{M_0(L_2 + L_3)}{L} - \frac{M_0 L_1}{L}}{d\pi L_1} \quad \text{式(2)}$$

但し、 $M_0$  : 腐食前試験体質量(mg),  $M_1$  : 腐食後試験体質量(mg),  $d$  : 異形鉄筋(D10)の公称直径=0.953cm

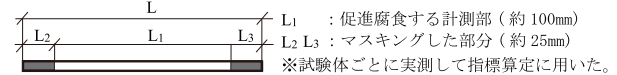


図-5 腐食量校正用の異形鉄筋サンプルの概要

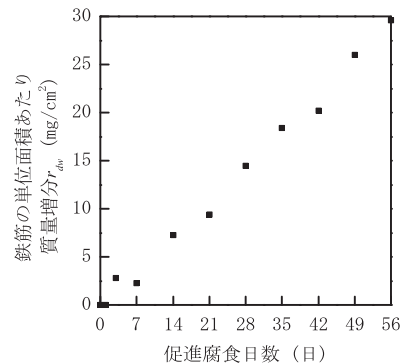


図-6 促進腐食日数と腐食量指標  $r_{dw}$  の関係

### (6) 実験の因子と水準

本節までに述べた実験の因子と水準，対応する試験体記号と図番号を表-2にまとめて示す。

表-2 実験の因子と水準

実験の因子		水準(試験体記号など)
試験体の種別	配筋	シングル(single), ダブル(double)
	材料構成	鉄筋のみ(RB) 鉄筋コンクリート(RC)
促進腐食日		0, 1, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56(日)
RFID タグの位置	鉄筋との相対位置	格子中心, 交差点近傍(図-2 参照) 位置は別報 <sup>8)</sup> を参考に設定 <sup>※2</sup>
	RW との距離 $d_{RW}$	0mm~通信できなくなる距離まで (図-3 参照)

※1 促進腐食日に計測および希塩酸塗布。

※2 鉄筋と RFID タグ, RW の相対位置は, 通信性能が最大・最小となる代表的な位置を既報<sup>8)</sup>の検討を元に選定した

### 3.3 実験結果と考察(腐食検知可能性の実証)

#### (1) 通信距離を指標とした鉄筋腐食の有無の検知

図-7に腐食量指標  $r_{dw}$  と通信可能な最大距離との関係を示す。配筋の方法や鉄筋との相対位置によらず，いずれの水準でも通信可能な最大距離は，腐食に伴って増加傾向を示した。通信可能距離の増分は通信最大距離に対して十分大きく，鉄筋の腐食進行と対応するものと推論できる。なお，鉄筋との相対位置によって通信距離の絶対値や増加の傾向に違いがあるがこれは測定誤差ではなく，その発生機構を別報<sup>8)</sup>に考察している。

通信距離を指標とする場合，定期検査の作業上は多少の問題がある。RC 部材に RFID タグを埋設すると，埋設位置はある位置に固定される。例えば，ダブル配筋の RC 部材表面から 120mm の格子中心位置に RFID タグを埋設したとする。この場合，図-7から「RFID タグの読取作業を部材表面位置から定期的に行った場合，19mg/cm<sup>2</sup>程度まで腐食が進行すると，ある日突然 RFID タグが読取可能となる」ことになる。すなわち，定期検査を行っていても鉄筋腐食がある程度に達するまで測定値は得られず，RFID タグの故障と判別できないので不便である。

#### (2) 通信成功率を指標とした鉄筋の腐食量検知

図-8に促進腐食日数ごとの通信成功率の経時変化を示す。通信可能距離と同様に，腐食の進行に伴って通信成功率も全ての試験水準で顕著に上昇した。ここで示さなかった試験水準についてもこの傾向は同様であった。このことから，腐食の進行と通信成功率上昇には高い相関があることを確認した。

通信成功率を評価指標とする場合，腐食の有無だけでなく腐食の進行についても(ある条件下で)定量的に検知できる可能性がある。例えば，図-8に示す埋設位置に RFID タグを埋設したと仮定する。この場合，図-9に

示す通り，通信成功率は，腐食量の増加に伴って(真偽値ではなく)数量的に上昇する。すなわち，埋設位置の適切な選定が今後可能となれば，部材表面からの定期的な通信成功率計測によって，腐食の進行の有無・速度(i.e 補修の緊急性)についても判断できる可能性がある。なお，定性的には，同一部材なら RFID タグの埋設位置が浅いほど早期の腐食を検出することも図-8から読み取れる。

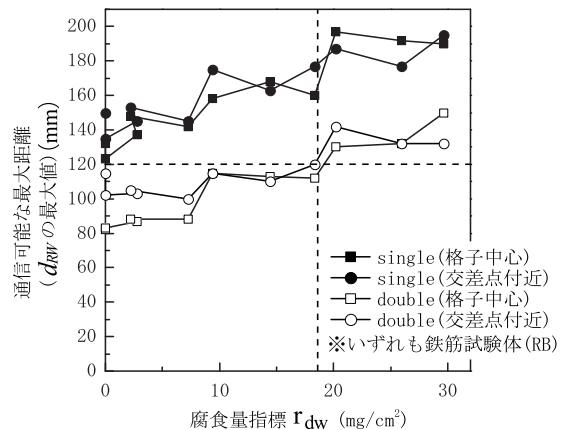


図-7 腐食量指標  $r_{dw}$  と通信可能な最大距離の関係

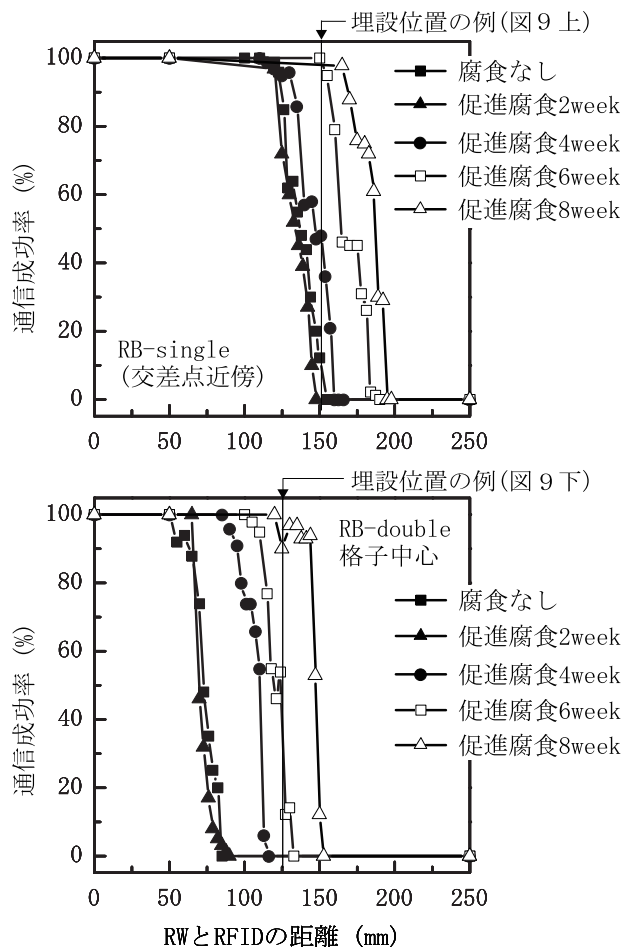
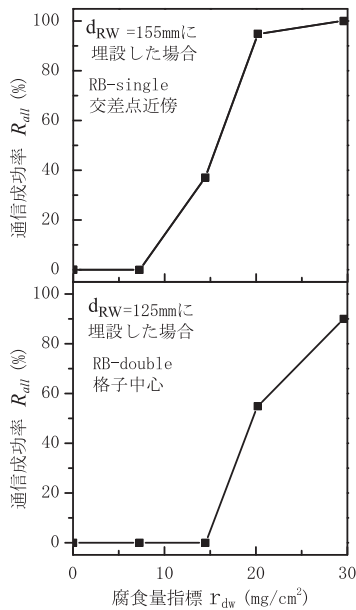


図-8 促進腐食日数ごとの通信成功率の経時変化  
上: シングル配筋(交差点近傍) 下: ダブル配筋(格子中心)



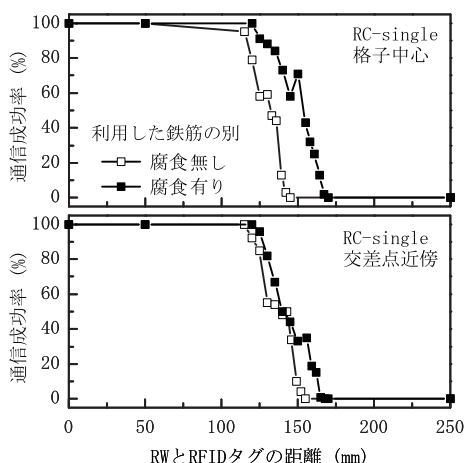


図一 9 定期的な通信成功率測定による腐食検知想定例  
 想定：RFID タグの位置(上：図一 8 上、下：図一 8 下)

### (3) RC 部材における鉄筋腐食検知可能性の検証

前節(2)では、鉄筋試験体を対象に、RC 部材表面を想定した位置からの定期的な通信成功率計測によって、鉄筋腐食の検知が可能であることを示した。本節では、これらの知見が RC 部材においても同様に適用できるか RC 試験体を用いて検証した。

図一 10 に促進腐食試験後の鉄筋を用いた RC 試験体(腐食あり)と通常の鉄筋を用いた RC 試験体(腐食無し)の通信成功率の比較を示す。鉄筋試験体より差は小さいが、いずれの水準でも“腐食有り”の方が、通信成功率が高かった。このことから、前節(2)までの知見は、RC 部材においても同様に成立するものと判断できる。なお、著者らは、RC 部材ではコンクリートの存在によって鉄筋のみの場合より導体の影響が小さくなると報告した<sup>4)</sup>。前述の結果(RC 試験体の方が腐食の有無による通信成功



図一 10 RC 試験体の通信成功率の比較(腐食の有無)

率の差が小さい)も同様の現象と推察される。

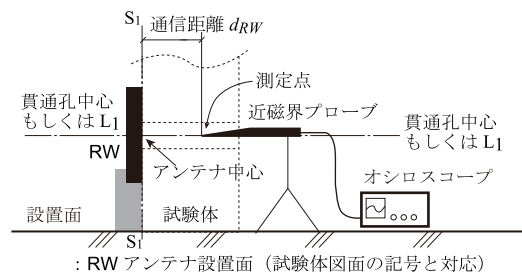
## 4 腐食に伴う通信性能向上の原因に関する考察

### 4.1 磁界強度測定実験の概要

前章までに、RC 部材に埋設された RFID タグとの通信性能を定期測定することで、鉄筋の腐食検知が可能であることを示した。しかしながら、単に鉄筋腐食を検知できるというだけでは工学的に不十分であり、鉄筋の腐食進行にともなって通信性能の向上が生じる理由も把握しておく必要がある。本報では、腐食進行による導体の減少が RW から RFID タグへの電力供給の増加をもたらしたことが原因と考え、この仮説の実験的検証を行った。すなわち、RW アンテナから生じる磁界によって RFID タグの動作電力を供給するという RFID システムの特性を考慮し、RFID タグの設置位置における磁界強度(A/m)を水準間で比較することで、腐食進行による通信性能の向上現象の解明を試みた。

### 4.2 実験の方法

図一 11 に磁界強度の測定方法を示す。図一 3 の RFID タグの設置位置を近磁界プローブで置き換えて測定した。磁界強度は、近磁界プローブをオシロスコープに接続し、磁界センサとして用いて測定した。プローブの出力電圧値(peek-to-peek)と ISO10373 の方法による磁界強度値(A/m)を線形回帰して( $R^2=0.99$ ) 磁界強度を求めた。



図一 11 磁界強度の測定方法

### 4.3 実験の結果と考察

図一 12 に促進腐食日数ごとの鉄筋試験体(RB)における磁界強度の測定結果を示す。腐食が進むと、磁界強度が高くなる傾向が観察された。ここに示さなかった他の試験水準でもおおむね同様の傾向であった。表一 3 に RC 試験体における通信可能最大距離における磁界強度を示す。いずれの測定位置条件でも、腐食がある場合の方が RFID タグ-RW 間の距離が長い(すなわち、空気中での磁界強度はより減衰する)にも関わらず、磁界強度は、腐食がない場合よりも大きいことが読み取れる。

以上のように、鉄筋試験体、RC 試験体のいずれの水準でも、磁界強度は、鉄筋が腐食している場合の方が高くなる傾向が観察された。この結果から、「腐食の進行に

ともなって RF 通信性能が高くなる現象」の主要因は、鉄筋の導体の部分の欠損に伴う RFID タグへの電力供給量の上昇にあると推察される。ただし、磁界強度と通信成功率の大小関係が逆転している場合もあったので、他の要因<sup>4</sup>に(例示)の影響が無視できるとはいえない。

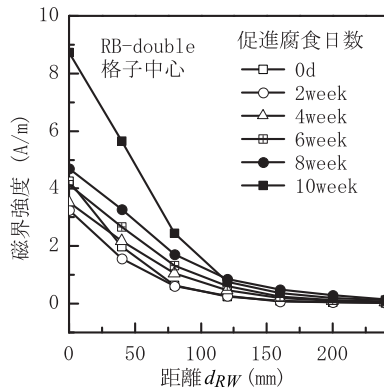


図-1 2 促進腐食日数ごとの磁界強度(鉄筋試験体)

表-3 腐食の有無による磁界強度の比較(RC-single)

測定位置	鉄筋の腐食の有無	通信可能最大距離	磁界強度
		(mm)	(A/m)
格子中心	腐食無し	142	0.49
	腐食有り	167	0.51
交差点近傍	腐食無し	152	0.47
	腐食有り	168	0.49

※磁界強度は、通信可能な最大距離の位置での値

## 5. 本報成果のまとめ

本報の成果は以下のようにまとめられる。

- RC 部材に RFID タグを埋設しておき、部材表面から通信性能を定期計測することで、埋設位置近傍の鉄筋腐食を非破壊に検知できることを新たに見出した。
- 提案した腐食検知技術は、コンクリートの“はつり”作業が不要であり、比較的安価な RFID タグのみの埋設によって実現できるという特長を有する。
- 腐食検知のための通信性能指標として、著者らの提案する“通信成功率”を用いることで、腐食の有無だけでなく、腐食の進行(腐食量の変化)についても、検知できる可能性を見出した。
- 磁界強度測定によって、腐食検知に用いる「鉄筋腐食による通信性能向上」現象の要因の一つが、鉄筋の腐食による導体部分の減少に伴うリーダライタから RFID タグへの電力供給増にあると推察した。

## 6. 今後の課題と展開

本報の提案技術には多くの課題がある。腐食形態や腐食因子による違い、部材の材料や形状、含水率、IC タグ自体の寿命など、各種の因子について、今後さらに検討

を進める必要がある。また、埋設された付近でしか検知できないという制約もある。したがって、設計時に腐食しやすい箇所がある程度分かっており、その箇所に RFID タグを埋設できる場合に採用できるものと考えている。本報の範囲では、RFID タグ、RW の網羅的検討に至っていないが、パッシブ型 HF 帯 RFID システムが共通して電磁誘導方式を採用しており、その帰結として導体の影響を受けやすいことから、本報の知見にはある程度の一般性があると推測している。以上のような課題認識のもとに、提案技術の検証と改良を進める予定である。

## 謝辞

本研究は、日本学術振興会 科学研究費補助金 基盤研究(B)、課題番号：22360227 の一部を用いて実施した。実験には、広島大学 大学院生 小宮奏恵さん、学部学生 加賀山浩志君の協力を得た。関係各位に感謝申し上げる。

## 参考文献

- 友田祐一, Mohamed Ismail, 大津政康: AE 法による鉄筋腐食の診断技術の開発, 土木学会第 60 回年次学術講演概要集, pp1189-1190, 2005.07
- 永井一徳, 宮里心一, 江里口玲, 佐藤達三: コンクリート中鉄筋の腐食検知センサの実用化に向けた開発研究, 日本材料学会講演論文集, Vol.60, pp.283-284, 2011.05
- RFID テクノロジー編集部 編: 無線 IC タグ導入ガイド, 日経 BP 社, pp.18-21, 2004.11
- 藤本郷史, 吉峰侑吾, 平原悠生, 大久保孝昭: パッシブ型 RFID タグ・センサを鉄筋コンクリート部材に埋設する場合の通信性能評価法, および壁・スラブ部材への適用, 日本建築学会構造系論文集, Vol.78, No.684, 2013.02
- 杉山央, 角倉英明, 大久保孝昭, 古賀純子, 平出務: 大型コンクリート試験体に埋め込んだ各種 IC タグの通信性に関する研究, 日本建築学会技術報告集, Vol.17, No.35, pp.5-10, 2011.02
- 野田和彦, 西村俊弥, 升田博之, 小玉俊明: 乾湿繰り返し条件下で低合金鋼上に生成したさび層のイオン選択透過性, 日本金属学会誌, Vol.64, No.9, pp.767-770, 2000
- 榊田佳寛, 花榮浩, 松林裕二, 原謙治, 安田正雪: 塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する実験, 日本建築学会構造系論文集, No.435, pp.19-27, 1992.05
- 平原悠生, 小宮奏恵, 藤本郷史, 大久保孝昭: RC 部材中に設置する RFID の開発とその評価に関する研究 その3 鉄筋が及ぼす通信性能への影響, 日本建築学会中国支部研究報告集, Vol.36, 2012.03