論文 低周波電磁波を用いた鉄筋コンクリート内部からのワイヤレス通信 の検討

浅野 勇*1・増川 晋*2・田頭 秀和*3・林田 洋一*4

要旨:鉄筋コンクリート内部から通信が可能なワイヤレスセンサの開発を目的に、その通信手段である低周波電磁波の基本的特性について検討した。その結果、送受信アンテナの位置関係が受信電圧に影響を与えること、帯鉄筋および送信コイルに近接する鉄筋により受信電圧が低下することを明らかにした。また、厚さ30cm、鉄筋比1.5%程度の鉄筋コンクリート供試体に送信コイルを埋設し、通信試験を行った結果、気中も含め最大30~40mのワイヤレス通信が可能であることを確認した。さらに、重力式コンクリートダムにおける現場通信実験の結果、鉄筋コンクリート中において約20mのワイヤレス通信が可能なことを実証した。

キーワード:鉄筋コンクリート,センサ,低周波電磁波,ワイヤレス通信

1. はじめに

コンクリート構造物の挙動に関する時系列データの 収集・モニタリングは、定量的な劣化予測手法を開発す るための基礎データを蓄積する技術として重要である。 また、施設の性能を直接的かつ継続的に監視することを 目指したヘルスモニタリング (Structural Health Monitoring, 以下 "SHM") を実現するためにも必要な技 術である。SHM とは、施設の要求性能に直結する応力や 腐食などの性能項目を継続的にモニタリングし、施設の 性能低下に応じた適切な補修・補強対策を行う手法であ り、SHM の実現のためには、小型で安価かつ設置性の優 れたセンサの開発が必要となる。そこで、本研究では、 筆者らがフィルダムでの間隙水圧を測定するために開発 した低周波電磁波を用いた地中通信を鉄筋コンクリート 内部からのワイヤレス通信に適用することを検討する。 ワイヤレスセンサはケーブルが不要であり、センサの小 型化、設置性の向上が期待される。

土木用のワイヤレスセンサとしては、地盤や盛土内に設置する間隙水圧計、土圧計などが実用化されている ¹⁾ ~³⁾。しかし、鉄筋コンクリート内からの通信特性については未解明な点が多い。一方、センサ付き無線 IC タグ(RFID)を利用した埋め込み型ワイヤレスセンサの研究も精力的に行われており、鉄筋計などが実用化されている ^{4),5)}。パッシブ型の RFID は電源が不要であるという点では有利であるが、コンクリート中への埋設深が最大でも数 10cm 程度であること、コンクリート中に自由水が多い打設初期には読み取りが不可能となる場合があるなどの欠点も存在する。

本研究では,鉄筋コンクリート内部 10m 程度から通信

可能なコンクリートワイヤレスセンサの開発を目的に, その通信手段である低周波電磁波の特性を検討する。

2. 低周波電磁波を用いた無線通信の概要

低周波電磁波を用いた無線通信の概要を図-1 に示す。 また、参考としてフィルダムへの埋設を目的に開発さ れたワイヤレス間隙水圧計の構造と外形を図-2に示す。 低周波電磁波はラジオ放送等に使用される電磁波と比 較すると距離減衰は大きいが媒質の透磁率と導電率の 影響を受け難い。すなわち、地中などにおいても近距 離では無線通信が可能である特徴を有する。低周波電 磁波を用いた無線通信では、図-1 に示すように、低周 波電磁波 (8.5kHz) を用いて送信コイルと受信コイルの 間で双方向データ通信を行う。送信コイルから発信さ れた電磁波により受信コイルに誘電電圧が発生する。 その電圧値をデジタル信号に変換し通信を行う。実際 の無線通信では受信コイルの位置における環境ノイズ が問題となる。データ送受信が可能なためには受信位 置における受信信号対ノイズ比(S/N比)が2以上であ ることが必要である。

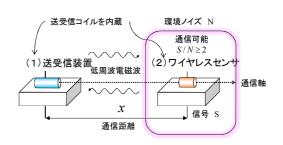


図-1 低周波電磁波を用いた無線通信

^{*1} 農村工学研究所 施設工学研究領域 施設機能担当 上席研究員 農博(正会員)

^{*2} 農村工学研究所 施設工学研究領域 構造担当 上席研究員 博士 (工学)

^{*3} 農村工学研究所 施設工学研究領域 構造担当 主任研究員 農修

^{*4} 農村工学研究所 施設工学研究領域 構造担当 主任研究員 農修

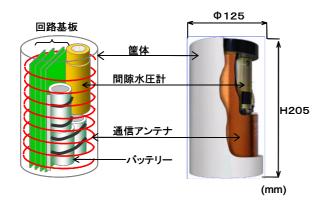


図-2 ワイヤレス間隙水圧計の構造と外形

3. 無線通信への影響要因

透磁率および導電率が均一である物質中における低 周波電磁波の強さは、1) 距離の 3 乗に反比例し、2) 地盤の透磁率と導電率に影響を受け減衰する³⁾。コンク リートの比透磁率は地盤とほぼ等しく 1, 鉄筋の比透磁 率は、解析では地盤よりはるかに大きな 200~2,000 程 度と報告されている⁶。また, 導電率については地盤で は $10^{-1} \sim 10^{-3}$ [S/m]程度 $^{6),7)}$, 鉄筋では $10^{5} \sim 10^{7}$ [S/m]程度 6),7)を設定する場合が多い。また、コンクリートでは室 内実験より 10^{-2} [S/m]程度 $^{8)}$ の値が得られている。以上か ら, コンクリートの透磁率および導電率は地盤とほぼ 等しいため, その減衰特性も地盤と同程度と推定され る。一方,鉄筋は透磁率が極めて大きいため,送信コ イルから流れ出す磁力線は鉄筋の長手方向に誘導され, 磁力線の流れを乱す働きがあると推察される。このた め, 鉄筋コンクリート中では地盤内とは異なった低周 波電磁波の減衰が発生する可能性がある。そこで, 鉄 筋コンクリート中における低周波電磁波の減衰の要因 として次の 3 つの要因を仮定し、それぞれの要因が低 周波電磁波に与える影響を実験により検討した。

- 1) 通信距離
- 2) コイルの位置関係
- 3) 媒質の違い(空気,鉄筋,コンクリート)

3.1 コイルの位置関係による影響

影響要因としてコイルの位置関係を設定した理由は 図-3 に示すように送受信コイルの配置によって受信コイルを通過する磁束密度が変化すると考えたためである。受信コイルを通過する磁束密度が大きいほど受信電圧も高くなるため、図-3の(a)軸方向のような配置で受信コイルの向きを変えると、と受信コイルを通過する磁束密度が変化し受信電圧は変化する。一方、(b)平行の位置関係では受信コイルの向きを変えても磁束密度は変化せず受信電圧は変化しない。

3.2 鉄筋の影響

鉄筋が低周波電磁波の減衰に及ぼす影響要因として

図-4 に示す熱エネルギー損失と誘導電磁界の 2 つを仮定した。鉄筋が送信コイルに近接する場合は低周波電磁波によって鉄筋に渦電流が発生し、熱エネルギー損失により低周波電磁波が減衰すると考えた。帯鉄筋などが存在する場合は、図-4 に示すような帯鉄筋がコイルの働きをして、送信コイルと逆の磁界を電磁誘導し電磁波を減衰させると考えた。

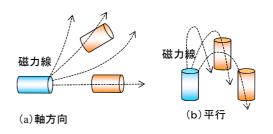


図-3 送受信コイルの配置と磁力線

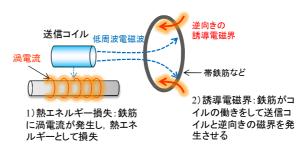


図-4 鉄筋による減衰効果

4. 実験シリーズ

1)屋外実験によりコイルの位置関係および鉄筋の減衰効果に関する基本的な特性を調べる。2) コンクリートの材齢変化等の影響を確認する。3) 実構造物での通信可能性を検証する。以上 1) ~3) を目的として,次の3シリーズの屋外実験を実施した。

(1) 屋外基礎実験

- ①空中における距離減衰実験
- ②コイル配置が減衰に及ぼす影響確認実験
- ③鉄筋が減衰に及ぼす影響確認実験
- (2)屋外埋設実験
- (3) コンクリートダムにおける現場通信実験

5. 屋外基礎実験

5.1 実験概要

屋外基礎実験の概要を図-5 に示す。実験では送信コイルから低周波電磁波を発信し、受信装置(受信コイル)に電磁誘導により発生する電圧(受信電圧)を測定した。実験は、2009年12月に農村工学研究所の地盤材料実験フィールドで実施した。フィールドにおける環境ノイズは概ね1mV以下であった。

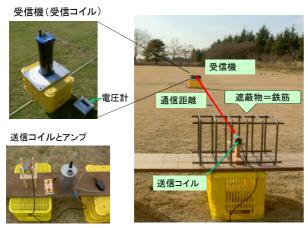


図-5 屋外基礎実験の概要

5.2 使用機材等

実験では大小 2 種類の送信コイルを用いた。外形および諸元を図-6 に示す。受信機には 8.5kz の低周波電磁波に対応した地中無線通信ポータブル受信器に電圧計を接続し使用した。送信コイルに対する遮蔽物としては丸鋼あるいは鉄輪を使用した。

種類	コイル (mm)	容器 (mm)	出力 (W)	周波数
大(L)	φ39×105	φ 48×120	1.8	8.5kHz
小(S)	φ 50×50	φ 60×60	1.0	



図-6 送信コイルの諸元

5.3 通信距離および通信角度変化の影響

実験の概要を図-7 に示す。送受信コイルを地面と平行に配置した(a)軸方向ケースおよび鉛直に配置した(b)平行ケースの2ケースに対して、通信距離xを5,8,10,20,30,50mと変化させ受信電圧を測定した。測定は、2往復、計4回実施した。両対数で整理したコイル大の通信距離と受信電圧の関係を図-8 に示す。グラフの点は、軸方向は4回の、平行は2回の測定の平均値である。対数変換した受信電圧と通信距離の間には直線関係が認められる。また、平行ケースの受信電圧は軸方向ケースの約1/2に低下した。

通信角度変化実験では、通信距離を 10m に固定し、通信角度 θ を 0、15、30、60、90°と変化させ受信電圧を求めた。コイルの配置は軸方向、平行の 2 ケースである。実験結果を図-9 に示す。グラフの値は 2 回の測定の平均値である。軸方向ケースでは通信角度が減少すると(2 つコイルは直交の位置関係に近づく)受信電圧は低下した。図には受信電圧を通信角度の 2 次関数による近似線を書き入れた(決定係数はすべて 0.98 以上)。一方、平行ケースでは、通信角度を変化させても受信電圧は変化せずほぼ一定の値を示した。

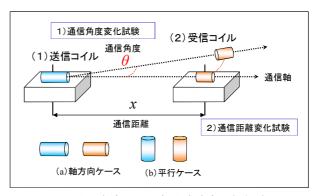


図-7 通信距離変化および通信角度変化実験の概要

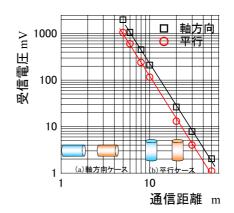


図-8 通信距離と受信電圧の関係

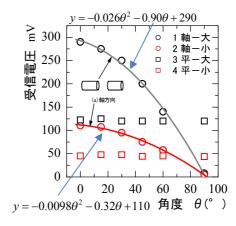


図-9 通信角度と受信電圧の関係

5.4 帯鉄筋の影響

帯鉄筋の影響実験の概要を図-10に示す。帯鉄筋を模擬するために、幅 20mm、厚さ 6mm、質量 980g の鉄板を曲げ加工し外径 320mm の鉄輪を 5 本作成した。5 本の鉄輪を等間隔に木製台座の上に固定し(図-10)、鉄輪の中心に送信コイルを設置した。送信受信コイルの位置関係は図-10 に示すように送信コイルの送信軸を帯鉄筋軸と直交させた (a) 帯鉄筋直交配置、送信軸を帯鉄筋軸方向に配置した (b) 帯鉄筋軸方向配置の 2 通りとした。通信距離 10m および鉄輪 5 本に固定し、帯鉄筋間隔を 10, 20, 30, 50cm に拡げ、帯鉄筋間隔と受

信電圧の関係を調べた。実験結果を図-11に示す。測定 は 1 回である。帯鉄筋直交方向配置では帯鉄筋間隔を 拡げても受信電圧に大きな変化は生じなかった。一方, 帯鉄筋軸方向配置では、帯鉄筋間隔を狭くすると受信 電圧は低下する傾向を示した。また, 受信電圧の値は 帯鉄筋直交方向配置の 1/2 以下に低下した。

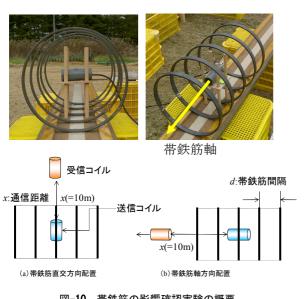


図-10 帯鉄筋の影響確認実験の概要

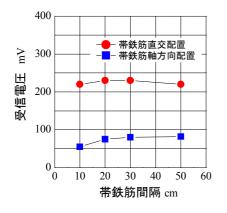


図-11 コイルの配置および帯鉄筋間隔と受信電圧の関係

5.5 近接鉄筋の影響

鉄筋近接による影響実験の概要を図-12に示す。通信 距離を 10m と固定し、送信コイル表面から鉄筋表面ま での距離 L[cm]を実験水準とし、Lを変化させ、Lと受 信電圧との関係を求めた。送信コイルと鉄筋の位置関 係を図-12 に示す (a) 正面, (b) 側面, (c) 直交の3 ケースを設定した。他の実験水準として鉄筋径(丸鋼: φ13, φ25), 鉄筋本数(1, 2 本)とした。Lの調整 にはアクリル板をスペーサとして使用した。アクリル は絶縁体であり導電率が極めて小さい (理科年表から 求めると 10^{-13} [S/m]未満 9))ため、電磁波の減衰に与え る影響は小さい。

3つの鉄筋配置ケースのすべてにおいてLが小さくな ると受信電圧も低下する傾向を示した。さらに、Lが1 ~3cm 以下の領域では、受信電圧が急激に低下した。 鉄筋配置が受信電圧の低下に及ぼす影響は、直交<正 面<側面配置の順に大きかった。最も影響が大きかっ た側面配置ケースの実験結果を図-13 に示す。L が 3cm 以下になると急激に受信電圧が低下することが分かる。

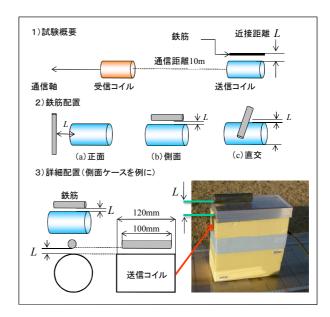


図-12 近接鉄筋の影響確認実験の概要

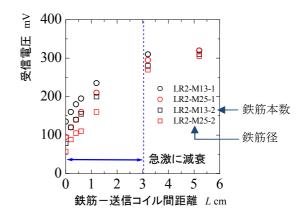


図-13 Lと受信電圧の関係((b)側面ケース)

5.6 考察

通信角度変化実験結果(図-9)から受信コイルに発 生する受信電圧は,送受信コイルの通信軸が一致する とき (0°) に最大、軸が直交するとき (90°) に最小 となった。これは、図-3 に示したように受信コイルを 通過する磁束密度が高いほど受信電圧が大きくなるた めと考えられる。よって、受信コイルを通過する磁束 密度が最大となるコイルの配置が最も通信効率が高く なる。図-11の帯鉄筋実験の結果から、送信コイルの通 信軸を帯鉄筋軸方向と直交させた配置では、帯鉄筋に

よる受信電圧の低下は認められなかったが、送信コイルの通信軸を帯鉄筋軸方向と一致させた配置では、帯鉄筋が存在しない場合の約 1/2 に受信電圧は低下した。この結果は、帯鉄筋に低周波電磁界と逆向きの誘導電磁界が発生し、送信を阻害するという仮説を支持する。送信コイル周辺に帯鉄筋に代表されるループ状の鉄筋配置が存在する場合は送信コイルの通信軸方向の選択に注意が必要である。図-13 の近接鉄筋の影響実験結果からは鉄筋の近接により受信強度の低下が確認された。これは鉄筋表面の渦電流の発生が原因と推測される。センサの配置にあたっては鉄筋表面からセンサを少なくとも 3cm 以上離すことが必要である。

6.屋外埋設実験

6.1 実験概要

コンクリートおよび鉄筋が低周波電磁波の減衰に与える影響を調べるために、送信コイルの埋設実験を行った。実験概要を図-14 に示す。実験では、 ϕ 58cm、H70cm の樽型容器(200L)の中心に送信コイルを設置し、鉄筋を立て込み、その後にコンクリートを打設した。水平通信距離を 5、10、20、30、50m と変化させ受信電圧を測定した。環境ノイズは概ね 1mV 以下であった。コンクリートは、普通ポルトランドセメント、呼び強度 21、スランプ 12cm、最大骨材寸法 20mm の生コンを使用した。鉄筋には丸鋼を使用し、 ϕ 25 の主筋を直径 260mm の円周上に 8 本、 ϕ 13 の帯鉄筋を 100mm ピッチで 6 段配置した。鉄筋比は約 1.5%である。

6.2 実験結果および考察

実験結果を図-15に示す。帯鉄筋軸と直交させ送信コ イルを設置した CASE1 では、気中(鉄筋設置前),鉄 筋(鉄筋設置後),鉄筋+コンクリート(コンクリー ト打設 1.5 時間後) の状態で電圧を測定した。CASE1 の気中における受信電圧を100%とすると,受信電圧は, 鉄筋設置後に 75%, コンクリート打設後に 65%に減衰 した。CASE2 は帯鉄筋軸方向に送信コイルを設置した ケースである。コンクリート打設後の受信電圧は CASE1 の気中における受信電圧の 35%に低下した。こ れは帯鉄筋の誘導電磁界の影響と推測される。図には 示していないが、CASE1 の打設 1.5 時間後と材齢 28 日 の受信電圧はほぼ一致した。材齢が低周波電磁波の減 衰に与える影響は小さいと推察される。図-15のグラフ の点線で囲った領域は環境ノイズが 1mV と仮定したと き, S/N 比が 2 未満となる領域である。S/N 比が 2 以上 となる最大通信距離を求めると, CASE1 が 45m, CASE2 が 30m であった。すなわち、周辺ノイズを 1mV と仮定 すれば, 厚さ 30cm, 鉄筋比 1.5%程度の鉄筋コンクリー ト内から最大 30~40m の通信が可能と推察される。

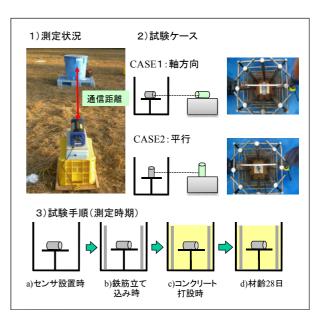


図-14 埋設実験の概要

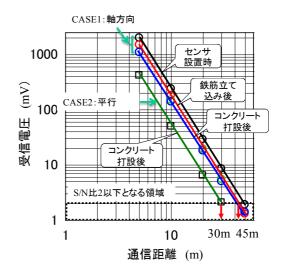


図-15 埋設実験の概要

7.コンクリートダムにおける現場通信実験

7.1 実験概要

鉄筋コンクリート内部からのワイヤレス通信の通信可能性を実証するために、栃木県内 S 重力式コンクリートダム(堤高 28.4m、堤頂長 105.0m)で現場通信実験を行った。実験概要を図-16に示す。実験では、監査廊に送信コイルを、ダム天端に受信コイルを設置し、鉛直通信距離と受信電圧の関係を求めた。送信コイルは図-6の大を使用した。計測区間は水平 38m とし、2mごとに図-16に示す計 20箇所の測定(M0~M19)を設定し、受信電圧を測定した。鉄筋コンクリートの厚さは10.5m (M0)、最深部の M13~M19 で 24.0m である。監査廊傾斜部では、1回の測定毎に鉛直通信距離が約1m増加するように測点を設けた。ダムには16m間隔で横継目(J2~J5)が設置されている。

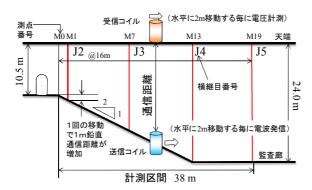
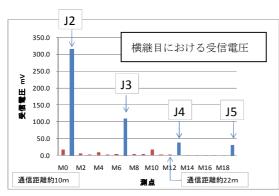


図-16 現場通信実験の概要

7.2 実験結果および考察

横継目における受信電圧の測定値を図-17 の上のグラフに示す。横継目では近傍の測点の受信電圧の10倍以上の電圧が測定された。継目には連続した空気層が存在するため低周波電磁波の減衰が抑制されたことが原因と考えられる。図-17の下のグラフに測点と受信電圧の関係を示す。M12 測点(通信距離 22m)までは周辺ノイズ(1mV と推定)の2倍以上の受信電圧が得られており、通信が可能である。現在の仕様の送信コイルを用いることにより少なくとも鉄筋コンクリート中10~20m程度のワイヤレス通信が可能と考えられる。



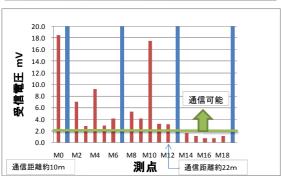


図-17 計測点と受信電圧の関係

8. まとめ

本実験の範囲内で以下の知見が明らかになった。

(1) 送受信コイルの配置により受信コイルを通過する 磁束密度が変化するため受信電圧は変化する。送受

- 信コイルの通信軸が一致する配置で受信電圧は最大となる。
- (2) 帯鉄筋により低周波電磁波は減衰する。これは送信 コイルと帯鉄筋の軸方向を一致させた配置では帯 鉄筋に送信コイルと逆向きの誘導電磁界が発生す るため電磁波の減衰が発生すると推察される。
- (3) 送信コイルと鉄筋が近接する場合,受信電圧は低下する。これは,鉄筋に渦電流が発生し,鉄筋の中で熱エネルギーとして損失されるためと推察される。ただし,送信コイル表面と鉄筋表面間の距離 L が3cm以上離れていれば受信電圧の低下は小さい。
- (4) 厚さ 30cm, 鉄筋比 1.5%程度の鉄筋コンクリート内 に送信コイルを埋設し, 距離減衰実験を行った。そ の結果, 周辺ノイズを 1mV と仮定した場合, 最大 30~40m の通信が可能であった。
- (5) 重力式コンクリートダムで通信実験を行った。その 結果,約20mのワイヤレス通信が可能なことが確認 された。

なお、本研究は、農林水産技術会議「新たな農林水産 政策を推進する実用技術開発研究」の一部として行われ たことを付記する。

参考文献

- 向後雄二,浅野 勇,林田洋一,遠目塚良一:ワイヤレス間隙水圧計の開発とフィルダムにおける観測,ダム工学, Vol.16, No.3, pp.165-176, 2006.
- 林田洋一,遠目塚良一,浅野勇,増川晋,田頭秀和:ワイヤレス間隙水圧計の長期計測性能の検証,農工研技報,No.210,pp.243-254,2010.3.
- 3) 浅野勇, 林田洋一, 増川晋, 田頭秀和, 遠目塚良一: 低周波 電磁波を利用した地中変位測定法の検討, 農工研技報, No.209, pp.163-171, 2009.3.
- 4) 江里口玲,小川彰一,大竹淳一郎,佐藤達三(2010): RFID ひずみ計測システム,太平洋セメント研究報告(TAIHEIYO CEMENT KENKYU HOKOKU),第158号,pp.55-64,2010.
- 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 タグの通信性に関する研究(材料施工), 日本建築学会技術報告集 15 (29), pp.9-14m, 2009.2.
- 6) 高村尚, 奥津一夫, 須賀原慶久, 虎田真一郎, 大内 仁: 地下深部岩盤中における無線データ通信特性に関する検討, 原子力バックエンド研究, Vol.12, No.1-2, pp.21-23, 2006.4.
- 7) 黒田清一郎,中里裕臣,奥山武彦:透過電磁波プロファイリングによる地盤導電率分布の推定精度,農工研技報,No.202,pp.205-214,2004.3.
- 8) スジョノ, A.S., 関博: 導電率によるコンクリートの細孔構造の予想について, コンクリート工学年次論文集, vol.20, No.2, pp.727-732, 1998.2.
- 9) 国立天文台編:理科年表 平成23, p.421, 2010.11.