

鉄筋およびコンクリートがワイヤレスコンクリートセンサの
通信性に与える影響

浅野勇*・増川晋**・田頭秀和**・林田洋一**

目 次

I 緒 言	187	7 通信角度変化試験	191
II 屋外低周波電磁波減衰試験	188	8 鉄筋配置による受信電圧低下の検討	193
1 低周波電磁波による通信の概要	188	9 近接鉄筋による受信電圧低下の検討	197
2 低周波電磁波減衰の影響要因	188	III 埋設試験	199
3 気中試験における作業仮説	188	IV 結 言	201
4 埋設試験における仮説	189	参考文献	201
5 気中試験の概要	189	Summary	203
6 距離減衰特性試験	190		

I 緒 言

我が国には延長約 40 万 km, 地球 10 周分の農業用水路が存在する。水路に代表される農業水利施設の多くはコンクリート施設である。これらの農業水利施設は 1960～90 年代に建設のピークを迎え、今後、施設の老朽化が大きな問題となる。老朽化が進む膨大な施設を目の前に、我々はより効率的な施設の維持管理を行う必要がある。

現行の農業水利施設の維持管理では、数年間隔の目視による定期点検により施設の健全度を推定し、補修・補強等の対策の必要性を判定している。しかし、点検項目が構造性能や水理性能などといった要求性能と直接的に結びついていない場合や性能低下がどの時点で発生したか正確に把握できないという問題点が存在する。性能低下をいち早く発見し適切な対策を講じる方法として、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マニタリング (Structural Health Monitoring, 以下“SHM”) が近年注目されている。SHM では、施設の性能に直接関係する応力などの性能指標を継続的にモニタリングし、施設の性能低下に応じた補修・補強対策を講じることで、性能低下に応じた適切な維持管理の実現を目指す手法である。重要度が高くかつリスクの高い

施設では、地震や豪雨後の性能低下をいち早く把握することができ、災害時の復旧対策にも有効な手段である。SHM を実現するためには小型安価かつ設置性の優れたセンサが必要である。ケーブルが不要なワイヤレスセンサは小型化が可能であり SHM への適用が期待される。

土木用のワイヤレスセンサについては、筆者らが開発に携わった低周波電磁波を利用したセンサがある (向後ら, 2006; 林田ら, 2009)。低周波電磁波を利用したセンサは地盤や盛土内に設置する間隙水圧計, 土圧計として実用化されている。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だ検討されておらず、鉄筋コンクリート中における減衰特性は未解明である。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 (江里口ら, 2010; 杉山, 2009)。パッシブ型のセンサ付き無線 IC タグは電源が不要であるという大きな利点が存在するが、コンクリート中への埋設深が最大でも数 10cm であること、コンクリート中に自由水が多い打設初期などに通信性能が急激に低下する欠点も存在する。現在のところ、鉄筋コンクリートの表面から 1m 以上深い場所に埋設でき、鉄筋コンクリート表面から数 10m 離れた地点へ観測値の送受信が可能でワイヤレスセンサは開発されていない。

本研究では、鉄筋コンクリートに数 m 埋め込みが可能でかつコンクリートの表面から数 10m 離れて通信が可能で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基本的な特性について検討する。

なお、本研究は、農林水産技術会議「新たな農林水産

* 施設資源部水利施設機能研究室

** 施設資源部構造研究室

平成23年1月21日受理

キーワード : SHM, 低周波電磁波, 鉄筋, コンクリート, ワイヤレス

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。

II 屋外低周波電磁波減衰試験

低周波電磁波の減衰特性を把握するために、①送信コイルを空气中に設置した場合の減衰特性を測定する試験（以下、気中試験）、②送信コイルを鉄筋コンクリートに埋設した場合の減衰特性を測定する試験（以下、埋設試験）を実施した。

1 低周波電磁波による通信の概要

低周波電磁波の通信概念を Fig.1 に示す。送受信の兼用コイルを内蔵した送受信装置とワイヤレスセンサの間で低周波電磁波（8.5kHz）を用いて双方向データ通信を行う。一方のコイルから発信された電磁波により他方のコイルには誘電電圧が発生し、その電圧値（受信コイルの回路電圧値、以下受信電圧をデジタル信号に変換し通信を行う。実用の際は受信コイル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。送電施設等が近傍に存在しない一般的な屋外での環境ノイズは1～2mV（受信コイルの回路出力電圧値）であることが多い。よって、所要の通信距離において受信電圧が2～4mV確保されれば通信が可能である。

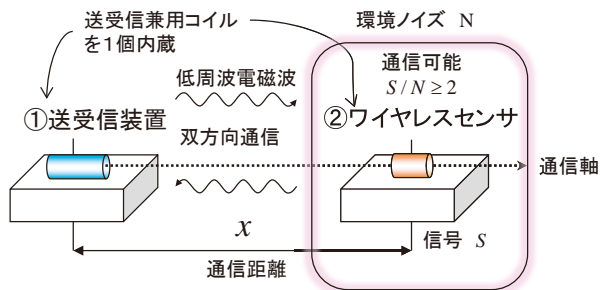


Fig. 1 低周波電磁波の通信概念

An outline of the wireless transmission with low frequency electromagnetic wave

2 低周波電磁波減衰の影響要因

透磁率及び導電率が均一である物質中における低周波電磁波の大きさは、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（浅野ら，2009）。コンクリートの比透磁率は地盤と等しくほぼ1、鉄筋の比透磁率は地盤に較べはるかに大きな200～2,000程度を設定する人が多い（小井戸，2008；高村ら，2006）。一方、導電率については地盤では $10^{-1} \sim 10^{-3}$ [S/m]程度（高村ら，2006；黒田ら，2004）、鉄筋では $10^5 \sim 10^7$ [S/m]程度（小井戸，2008；高村ら，2006）を設定する人が多い。また、室内試験よりコンクリートの導

電率として 10^{-2} [S/m]程度（スジヨノ，1998）の値が得られている。これらの結果から、コンクリート自体の減衰は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ので、送信コイルから流れ出す磁力線が鉄筋に集中することが想定される。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が低下する要因として、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）の3つを仮定し試験を行う。

3 気中試験における作業仮説

a 距離減衰に関する仮説

前項2で述べたように、透磁率及び導電率が均一である物質中における低周波電磁波の大きさは理論的には距離の3乗に反比例する。よって、送受信コイルの配置、媒質などの試験条件を固定し、通信距離を変化させ受信電圧との関係を求めれば、受信電圧 y [mV]と通信距離 x [m]の間には式(1)の関係が成り立つと考えられる。

$$y = \frac{P}{x^3} \quad (1)$$

ここで、 P はコイルの出力、位置関係で決まる定数である。(1)式の両辺の対数を取り、整理すると式(2)が得られる。

$$\log y = -3 \log x + \log P \quad (2)$$

すなわち、 $\log y$ と $\log x$ の間には直線関係が存在し、傾きは-3、コイル出力と位置関係に依存する切片 $\log P$ が得られる。理論上は(2)式の傾きは-3となるが、これは媒質が均質であることを仮定した結果であり、屋外試験では媒質が不均一であるため通常傾きは-3に一致しない。そこで、受信電圧と通信距離の試験値を整理するために式(3)を試験式として用いる。つまり、ある試験条件における通信距離-受信電圧の距離減衰特性を傾き a で評価し、コイルの出力が受信電圧に与える影響を切片 b で評価することにする。

$$\log y = a \log x + b \quad (3)$$

ここで、 a はある試験条件における低周波電磁波の距離減衰特性を表す定数、 b はコイルの出力、位置関係で決まる定数である。

b 送受信コイルの配置による受信電圧低下に関する仮説

Fig.2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。受信電圧は、受信コイルを通過する磁束密度の大きさに比例すると考え

られることから、磁束密度に比例して受信電圧は増加すると考えられる。すなわち、Fig.2 に示す (a) 軸方向のコイル配置では、受信コイルの位置が変化すると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も変化する。一方、(b) 平行の位置関係では受信コイルを通過する磁束密度が変化しないため受信電圧は一定であることが想定される。これらの仮説が成り立つか、送受信コイルの配置を変化させた試験を行い検証する。

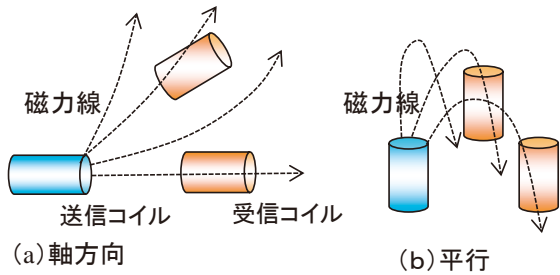


Fig. 2 送受信コイルの配置と磁力線

Layout of the transmitting and receiving coil and magnetic field lines

c 鉄筋による受信電圧低下の要因に関する仮説

鉄筋による受信電圧低下の要因として Fig.3 に示す 3 つを仮定する。鉄筋の透磁率は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集中する。その結果、磁界の流れが乱され受信電圧が低下すると考えられる。次に、鉄筋が送信コイルに近接する場合（鉄筋から数 cm の範囲に存在）は、送信コイルから発信される電磁波によって鉄筋に渦電流が発生し、その熱エネルギー損失のため低周波電磁波が減衰し、受信電圧が低下すると考えた。さらに、送信コイルの周辺に帯鉄筋などが存在する場合には、Fig.3 に示すように帯鉄筋がコイルの働きをして、送信コイルが発信する電磁界と逆向きの誘導電磁界を発生させる可能性があり、その結果として送信コイルから発信される電磁波を減衰させると考えた。これら 3 つの仮説を検証するために、主鉄筋の影響、帯鉄筋の影響および近接鉄筋の影響を調べる試験を実施する。

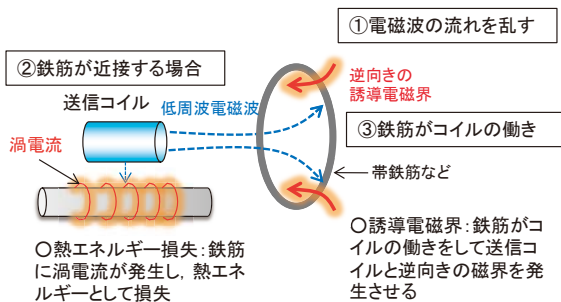


Fig. 3 鉄筋による減衰効果

The attenuation effects of electromagnetic waves by reinforcing bar

4 埋設試験における仮説

埋設試験では、送信コイルを鉄筋コンクリート供試体に埋設し、打設時、打設後のコンクリート硬化時における鉄筋コンクリート内からの通信可能性について検証する。作業仮説としては、鉄筋コンクリート中の低周波電磁波の減衰は主として鉄筋によって発生し、コンクリートに依存する減衰は小さいとする。

5 気中試験の概要

a 試験概要

気中試験の概要を Fig.4 に示す。試験では試作した送信コイルから低周波電磁波を発信し、受信コイルを内蔵したポータブル受信機により受信コイルに電磁誘導により発生する電圧を測定した。通信距離、コイルの位置関係、鉄筋遮蔽などの条件を変化させ、受信電圧の変化を調べた。試験は、2009年12月に農村工学研究所の地盤材料試験フィールドで実施した。受信機により測定した試験中におけるフィールドの環境ノイズは概ね 1mV (実効値電圧, 以下 V は実効値電圧を意味する) 以下であった。

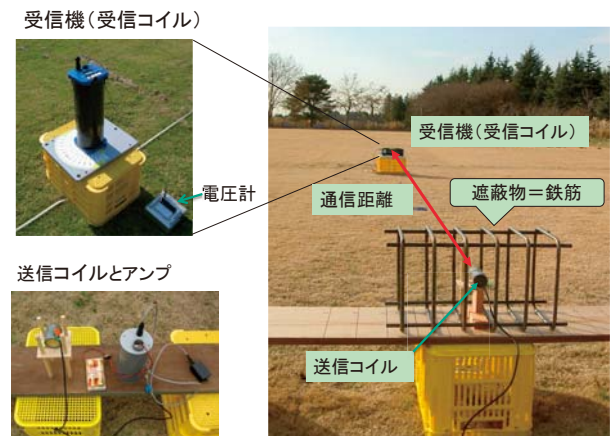


Fig. 4 気中試験の概要

Schematic view of experimental equipment (in field)

b 使用機材等

試作した送信コイルの外形および諸元を Fig.5 に示す。寸法、出力が異なる 2 種類の送信コイルを試作した。受信機には株式会社坂田電機製の地中無線通信ポータブル受信器 (EO-029) に電圧計を接続し受信回路出力電圧を測定した。送信コイルに対する遮蔽物としては丸銅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)	φ 39 × 105	φ 48 × 120	1.8	8.5kHz
小(S)	φ 50 × 50	φ 60 × 60	1.0	

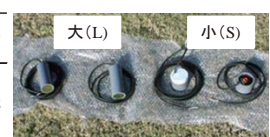


Fig. 5 送信コイルの諸元

Specification of the transmitting coils

c 試験シリーズ

低周波電磁波の空中における距離減衰，鉄筋による減衰効果を明らかにするために，以下の試験シリーズを実施した。

- (1) 低周波電磁波の空中における距離減衰特性
 - ①通信距離変化試験
 - ②通信角度変化試験
 - ③コイルの位置関係を変化させた試験
- (2) 鉄筋による減衰特性試験
 - ①主鉄筋の影響試験
 - ②帯鉄筋の影響試験
 - ③近接鉄筋の影響試験

6 距離減衰特性試験

a 試験概要および試験ケース

Fig.6 に距離減衰試験の概要を，Table 1 に試験ケースを示す。空中における低周波電磁波の減衰特性を調べるために，送受信コイルの通信距離を変化させ，通信距離と受信電圧の関係を求めた。試験水準はコイルの寸法，位置関係および通信距離である。コイル配置として Fig.6 に示す2つのコイルの通信軸を一致させた (a) 軸方向，2つのコイルの通信軸が平行な (b) 平行の2水準，コイル寸法として大小2水準を設定し，通信距離 x を 5, 8, 10, 20, 30, 50m 変化させ受信電圧を求めた。なお，軸方向試験では2往復，計4回の測定を行った。また，平行試験では1往復，計2回の測定を行った。試験では，受信コイルの標高を一定にするために，送受信コイルの標高差が±100mm 以内に収まるように受信コイルの台座の高さを調整した。なお，送信コイルから発信される

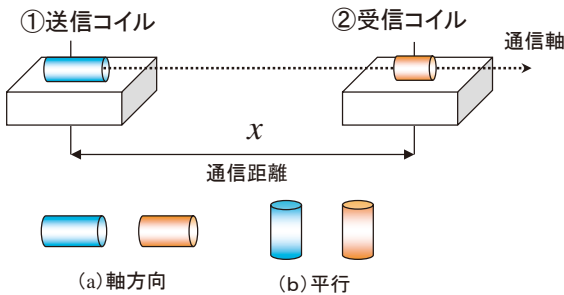


Fig. 6 距離減衰試験の概要 (気中)

Schematic illustration of the attenuation characteristics test (in field)

Table 1 試験ケース
Experimental conditions

実験ケース	コイル種類	コイルの配置	通信距離 [m]
LA	大 (L1)	軸方向	5, 8, 10, 20, 30, 50
LP		平行	
SA	小 (S1)	軸方向	
SP		平行	

電磁波の一部は地盤内を透過して受信コイルに到達しており，空中試験と称しているが，本試験は送受信コイルを完全に空中に設置した場合の減衰試験ではないことに注意されたい。

b 試験結果

軸方向試験および平行試験の試験結果をそれぞれ Fig.7, Fig.8 に示す。グラフの点は，軸方向試験は4回の測定，平行試験は2回の測定の平均値である。軸方向試験における受信電圧の平均変動係数は2~3%であった。Table 1 の試験ケースに対して Fig.7, Fig.8 のデータを直線回帰することにより式 (3) に示した低周波電磁波の距離減衰特性を表す定数 a およびコイルの出力，位置関係で決まる定数 b を求めた。決定係数はすべて 0.98 以上であった。試験結果を Table 2 に示す。

Table 2 距離減衰特性
The characteristics of attenuation test (in field)

実験ケース	コイル種類	コイルの配置	係数 a	係数 b
LA	大 (L1)	軸方向	-3.01	5.36
LP		平行	-3.03	5.11
SA	小 (S1)	軸方向	-2.89	4.92
SP		平行	-2.90	4.63

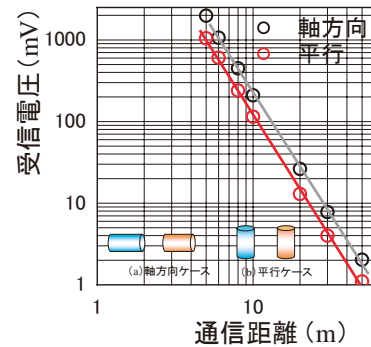


Fig. 7 距離減衰試験結果 (コイル大)
Relationship between the transmission distance and the receiving voltage (the large coil)

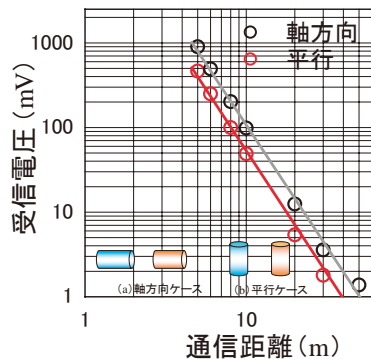


Fig. 8 距離減衰試験結果 (コイル小)
Relationship between the transmission distance and the receiving voltage (the small coil)

c 考察

Fig.7 および Fig.8 から受信電圧の対数値と通信距離の対数値の間には線形の関係が成り立つと推察できる。Table 2 のコイル大とコイル小の a の値を比較すると、コイルの寸法が同一であれば a の値はほぼ等しい。つまり、コイルの寸法が同一であれば、コイルの配置が変化しても低周波電磁波が伝搬する場の条件が変化しなければ Fig.7 および Fig.8 に示した受信電圧の直線の傾きはほぼ一定であると推察される。しかしながら、今回は試験データも少ないため、定量的な検討は今後の課題と考える。

Table 2 に示す切片値 b は通信距離がほぼ0の地点における受信電圧の値を示すと考えられる。このことから、 b は送信コイルの出力値に比例すると考えられる。そこで、 b はコイル出力 P の対数値 $\log P$ [W] に比例すると仮定し、式 (4) により推定が可能と仮定した。ここで、 k は比例定数である。

$$b = k \log P \tag{4}$$

式 (4) が成り立つか検証するためには出力の異なるコイルに対して距離減衰試験を行えば良い。しかし、今回の試験では出力が異なる2つの送信コイルのみしか試験を行っていない。そこで、過年度農工研で行ったワイヤレス間隙水圧計を対象とし距離減衰試験結果より求めた切片値 b を今回の試験データに加えて検討を行った (向後

Table 3 コイル出力と切片値
The coil outputs and the intercept b

実験ケース	コイルの配置	コイル出力 [W]	切片値 b	備考
1	軸方向	1.0	4.92	S (コイル小)
2		1.8	5.36	L (コイル大)
3		5.4	5.81	ワイヤレス間隙水圧計

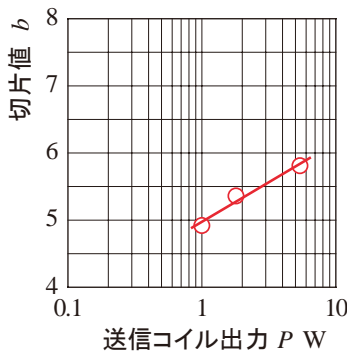


Fig.9 送信コイル出力と切片値 b の関係
Relationship between the coil outputs and the intercept b

ら、2006、図 -13 から引用)。検討に用いたコイル出力値と b の値を Table 3 に示す。Table 3 の値をグラフ化した結果を Fig.9 に示す。グラフから切片値 b と $\log P$ はほぼ線形関係にあることが分かる。最小2乗法により切片値 b を $\log P$ で線型回帰すると式 (5) の結果を得た。

$$b = 1.18 \log P + 4.97 \tag{5}$$

今回と同様な空中試験を実施する場合は、式 (5) を用いてコイル出力 P から式 (3) の切片をある程度推定することが可能と考える。

7 通信角度変化試験

a 試験概要および試験ケース

送受信コイルの位置関係が受信電圧に及ぼす影響について調べた。Fig.10 に示す9通りの送受信コイルの位置関係を設定し、通信距離を10mに固定し、各配置での受信電圧を測定した。なお、試験ケースは9通りであるが、実質的な送受信コイルの空間的配置は Fig.10 に示す (a) 軸方向、(b) 平行、(c) 直交の3通りである。

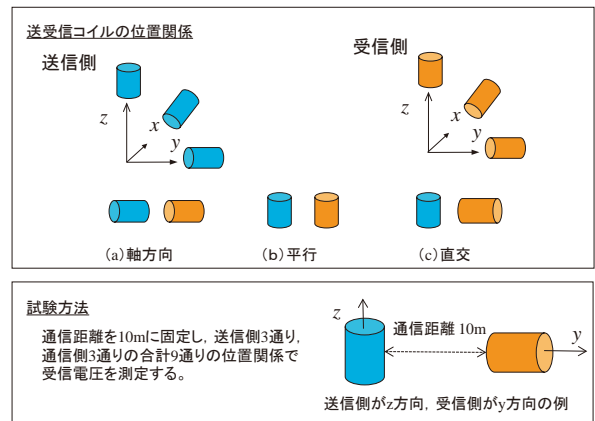


Fig.10 試験概要

Schematic view of layout tests of the transmitting and receiving coil

次に、平面内における通信角度の変化が低周波電磁波の通信特性に与える影響を調べるために、Fig.11 に示すように通信距離を10mに固定し、高さ一定の平面内で通信角度 θ を変化させ、送信角度と受信電圧の関係を調べた。Table 4 に試験ケースを示す。試験水準はコイルの寸法、位置関係および通信角度である。コイル寸法として大小2種類を、コイルの配置として軸方向と水平の2水準を変化させた。試験では、送信コイルを半径10mの円の中心に固定し、通信角度 θ を0, 15, 30, 60, 90° 変化させながら受信コイルを円周上で移動し、電圧測定を行った。軸方向配置における電圧測定の際は、受信コイルの通信軸が送信コイルに向かうように調整した。電圧測定は1往復、計2回の測定を行った。

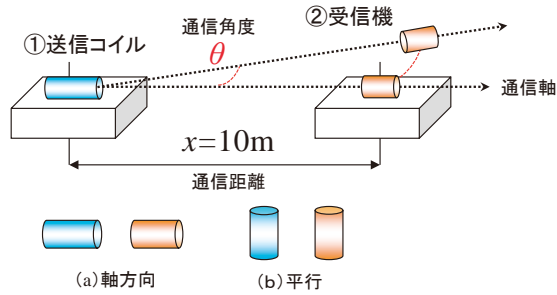


Fig. 11 通信角度変化試験の概要

Schematic of rotation tests for a receiving coil around a transmitting coil

Table 4 試験ケース (通信角度変化試験)
Experimental conditions (rotation tests)

実験ケース	コイル種類	コイルの配置	通信角度 [度]
1	大 (L 1)	軸方向	0, 15, 30, 45, 60, 90
2		平行	
3	小 (S 1)	軸方向	
4		平行	

b 試験結果

(1) 送受信コイルの配置と受信電圧の関係

送受信コイルの位置関係と受信電圧値を Table 5 に示す。表の値は3回以上測定した平均値である。また、表の電圧比は軸方向の配置に対する他の配置における受信電圧値の比を表す。Table 5 から送受信コイルの位置関係と受信電圧の関係として以下の結果を得た。

- ①送受信コイルの配置が軸方向において受信電圧は最大となる
- ②平行配置の場合、受信電圧は軸方向配置のほぼ 1/2 となる
- ③直交配置の場合、受信電圧は軸方向配置のほぼ 1/100 となる

Table 5 送受信コイルの位置関係と受信電圧
The results of the layout tests

コイルの配置	(a) 軸方向	(b) 平行	(c) 直交
受信電圧 [mV]	240.0	108.0	2.4
電圧比	1	0.45	0.01

(2) 通信角度と受信電圧の関係

通信角度を変化させた試験結果を Fig.12 に示す。グラフの値は2回の測定の平均値である。軸方向配置では、受信電圧を通信角度の2次関数で近似することが可能であった。受信電圧を y [mV], 通信角度を θ [度] とすれば、

軸方向配置の試験結果に対する受信強度と通信角度の回帰式として式 (6) ~ (7) が得られる。回帰式の決定係数はすべて 0.98 以上であった。Fig.12 に示すように平行配置 (グラフの記号□), つまり送受信コイルを地表面に対して鉛直に設置した場合には、通信角度が変化しても受信電圧はほとんど変化せず一定の値を示した。

$$y = -0.026 \theta^2 - 0.90 \theta + 290 \quad (\text{軸-大}) \quad (6)$$

$$y = -0.0098 \theta^2 - 0.32 \theta + 110 \quad (\text{軸-小}) \quad (7)$$

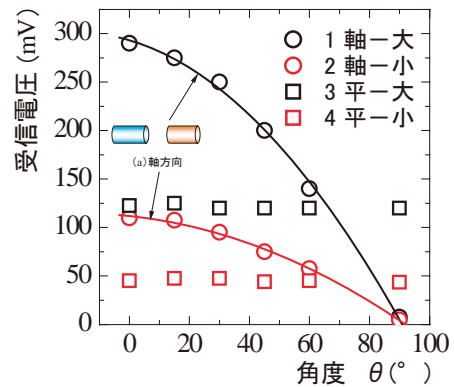


Fig. 12 通信角度変化試験の結果

Relationship between the transmission angle and the receiving voltage

c 考察

Fig.12 から、軸方向配置のケースでは送受信コイルの通信軸が一致する場合 (通信角度 0°) で受信電圧最大、通信軸が直交する場合 (通信角度 90°) で受信電圧は最小 (ほぼ 0) となった。それぞれのケースに対して、受信コイルを通過する磁力線の数を考えれば、Fig.2 から通信軸が一致する場合は受信コイルを通過する磁力線の数は最大に、通信軸が直交する場合は送信コイルから流れ出す磁力線が受信コイルの通信軸方向に侵入できないためほぼ 0 となると考えられる。すなわち、Fig.12 に示した軸方向配置における通信角度の増加に伴い受信電圧が減少する試験結果は、通信角度が大きくなると受信コイルを通過する磁力線の数、すなわち磁束密度が少なくなり、受信コイルに励起される電圧が低下するというメカニズムにより説明が可能である。さらに、Fig.12 に示す平行配置の試験結果が通信角度にかかわらず一定値を示すことも Fig.2 に示したように受信コイルを通過する磁束密度の大きさが変化しないことから説明することができる。以上の結果より、送受信コイルの位置関係による受信電圧の低下は、コイルの位置関係により受信コイルを通過する磁束密度が変化することが原因であり、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大きくなると考えられる。

8 鉄筋配置による受信電圧低下の検討

鉄筋による受信電圧低下の要因について検討する。まずはじめに、鉄筋による電磁界の乱れが受信電圧の低下に及ぼす影響について検討する。送信コイルの周辺に透磁率の高い鉄筋が配置されると、鉄筋の長手方向に磁力線が集中する。このため、鉄筋が存在しない場合と異なる磁界の流れが生じ、受信コイルに発生する電圧も変化する。また、鉄筋がコイルの働きをして、送信コイルが発信する電磁界と逆向きの誘導磁界を発生させることで電磁波を減衰させる可能性がある。しかしながら、配筋による減衰効果を検討するためには、3次元の様々な鉄筋配置を考慮する必要がある、その試験ケースは膨大なものになる。そこで、今回の試験では、実際の構造物で設置される代表的な鉄筋配置を仮定し、試行錯誤的に鉄筋の配置を変化させ、配筋に対する受信電圧の変化を調べることにした。代表的な鉄筋配置としては、主鉄筋配置と帯鉄筋配置を選択した。

a 主鉄筋の影響試験

(1) 試験概要および試験ケース

鉄筋配置として主筋配置を想定し、主鉄筋配置と受信電圧低下の関係について調べる。試験の概要および送受信コイルの配置を Fig.13 に示す。送信コイルの配置により試験ケースを Fig.13 に示す 1) 直交配置 (送信コイルは西向き、主鉄筋軸方向と直交) および 2) 平行配置 (送信コイルは南向き、主鉄筋軸方向と同方向) に分けて試験を実施した。これは、実際のセンサの埋設に際しても、これら 2 つのケースのいずれかに合致すると考えたためである。送受信コイルの配置としては、最も受信電圧が大きいと想定される「軸方向」と次に大きいと考えられる「平行」の位置に配置した。

主鉄筋を固定するために Fig.14 に示す直径 150mm および 300mm の同心円上に鉄筋を通す孔を空けた塩ビ板を 2 枚準備し、2 つの板を向かい合わせて台座の上に固定し、鉄筋を所定の孔に通し、主鉄筋の配置を模擬した (Fig.13 の写真)。送信コイルは Fig.13 に示すように主筋の中央部に配置した。試験水準は鉄筋本数、径、長さ、コイルの位置関係および通信距離とした。Fig.14 に示す 1～8 の孔に全て鉄筋を配置した場合、鉄筋表面と送信コイル表面まで距離は 10cm 以上離れた状態にあった。Fig.14 に示す内側の円周上の 9～12 に鉄筋を配置すると、送信コイルを西に向けるか南に向けるかの配置によって異なるが、鉄筋表面から送信コイル表面まで距離は 2～5cm 程度に接近した。試験ケースを Table 6 に示す。MR1 シリーズでは、送受信コイルの位置関係、鉄筋径 (13mm)、長さ (50cm)、通信距離 (10m) を固定し、Fig.14 に示した鉄筋設置孔に鉄筋を 1 番の孔から順番に設置してゆき、鉄筋本数の増加と受信電圧の関係について調べた。MR2 シリーズでは、Fig.14 の 1～8 番の孔にすべて $\phi 13$ の丸鋼を設置し、送信コイルを西方向に

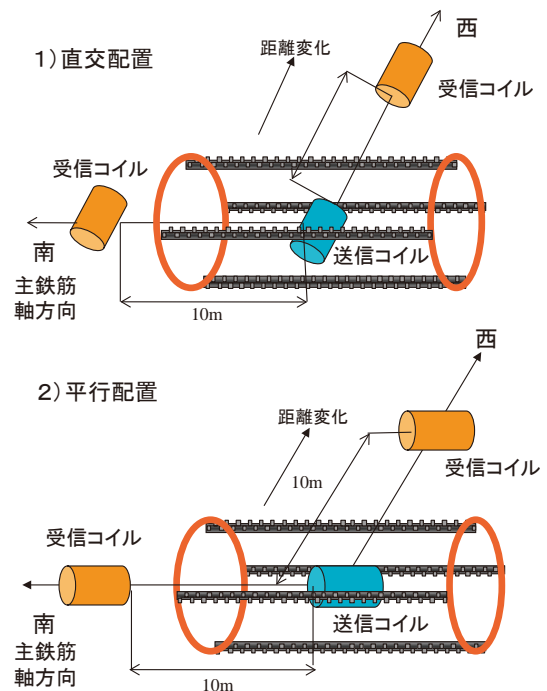
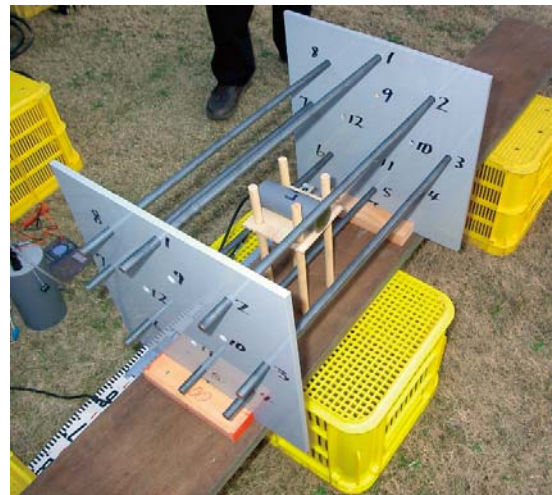


Fig. 13 主鉄筋影響試験の概要

Schematic of testing system for influence of reinforcing bar on receiving voltage

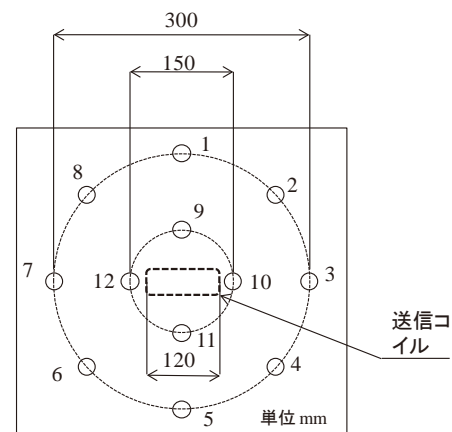


Fig. 14 鉄筋配置のための塩ビ板

Vinyl chloride panel for reinforcing bars set in

Table 6 主鉄筋影響試験の試験ケース
Experimental conditions for the influence of reinforcing bar

試験シリーズ	試験ケース	目的	コイルの大きさ	送受信コイルの通信軸方向	受信コイル設置位置	通信距離	鉄筋径 [mm]	鉄筋本数	鉄筋長さ [cm]
MR1	MR1_1	コイルの位置関係と鉄筋本数と受信電圧の関係調べる	大	直交	西	10m (固定)	φ 13	0 ~ 12	50
	MR1_2			直交	南				
	MR1_3			平行	西				
	MR1_4			平行	南				
MR2	MR2_1	鉄筋を8本に固定し、距離減衰を調べる		平行	西	5, 10, 20, 50m	φ 13	8	50
	MR2_2			直交	西				
MR3		鉄筋を8本に固定して、鉄筋の径、長さを変えた場合の受信電圧変化を調べる		直交	西	10m (固定)	φ 13 φ 25	8	50 200
				直交	南				
				平行	西				
				平行	南				

10, 20, 30, 50m 移動させ主筋が存在する状態における通信距離と受信電圧の関係を求めた。MR3 では鉄筋径、鉄筋の長さが受信電圧に与える影響について検証した。

(2) 試験結果

鉄筋本数と受信電圧の関係を **Table 7** に示す。表の値は2回の測定の前平均値である。試験ケース MR1_1, MR1_3 の結果から φ 13 の丸鋼を **Fig.14** に示す1から8の孔すべてに設置しても受信電圧は鉄筋なしの値と同じであった。さらに、1~12の孔に計12本の鉄筋を設置すると、鉄筋なしの場合に比べて受信電圧は20~40%低下するが、これは鉄筋の近接が影響したものと推察される。以上の結果から、送信コイルを主鉄筋から10cm程度離せば、主鉄筋による受信電圧低下は回避できると考えられる。

Table 7 主鉄筋影響試験結果
Receiving voltage for some layouts of reinforcing bar

試験ケース	MR1_1	MR1_2	MR1_3	MR1_4
送信コイル配置	直交配置		平行配置	
受信コイル配置	西	南	西	南
鉄筋なし	220	-	113	-
1, 3	220	-	113	-
1, 3, 5, 7	220	-	113	-
1 ~ 8	220	110	113	220
1 ~ 12	135	-	90	-

試験シリーズ MR2 では、主鉄筋の数を8本に固定し、低周波電磁波の距離減衰特性を求めた。試験結果を **Fig.15** に示す。グラフの値は2回の測定の前平均値である。受信電圧を y [mV], 通信距離を x [m] とすれば、

Table 6 の試験ケースに対して以下の y の線型回帰式が得られる。決定係数はすべて 0.98 以上であった。

$$\log y = -3.00 \log x + 5.36 \quad (\text{MR2}_1) \quad (8)$$

$$\log y = -2.78 \log x + 4.87 \quad (\text{MR2}_2) \quad (9)$$

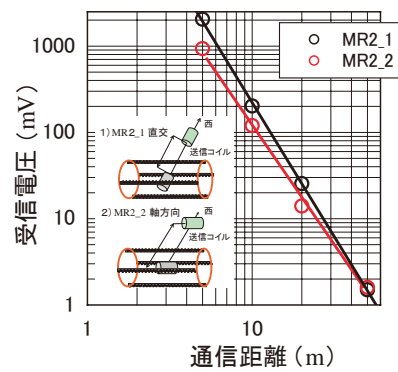


Fig. 15 主鉄筋影響試験結果
Relationship between the transmission distance and the receiving voltage (for the influence of reinforcing bar)



Fig. 16 主鉄筋影響試験 (鉄筋径 φ 13, φ 25, L = 50cm)
View of effect test for reinforcing bar
(diameter φ 13, 25mm, length = 50cm)



Fig. 17 主鉄筋影響試験 (φ13, 鉄筋長 200mm)
View of effects test for reinforcing bar
(diameter φ13, length = 200cm)

試験シリーズ MR3 では、通信距離 10m、鉄筋配置を Fig.14 の 1～8 の計 8 本に固定し、①鉄筋長 50cm、鉄筋径を φ13 および φ25 に変化させた試験 (Fig.16)、②鉄筋径 φ13、鉄筋長さを 50cm および 200cm に変化させた試験を行った (Fig.17)。その結果、鉄筋の長さおよび径を変化させても Fig.13 に示した 4 通りの送受信コイルの位置関係において、受信電圧に差は生じなかった。

b 帯鉄筋の影響試験

(1) 試験概要および試験ケース

帯鉄筋が受信電圧の低下に及ぼす影響について調べた。試験の概要を Fig.18 に示す。帯鉄筋を模擬するために、幅 20mm、厚さ 6mm の鉄板を曲げ加工し外径 320mm、質量 980g の鉄輪を 5 本作成した。5 本の鉄輪を Fig.18 に示すように等間隔に木製台座の上に固定し、鉄輪の中心に送信コイルを設置した。なお、帯鉄筋をコイルと想定した場合のコイルの軸方向を帯鉄筋軸と呼ぶことにする (Fig.18)。受信コイルは Fig.19 (Fig.18 の平面図) に示す①～④の 4 水準の配置を設定した。(1) 直

交配置では、送信コイルを西に向けて設置した。この場合送信コイルの通信軸と帯鉄筋軸は直交する。(2) 平行配置では、送信コイルを南に向けて設置した。この場合送信コイルの通信軸と帯鉄筋軸は一致する。試験水準は、鉄輪の間隔 (以下帯鉄筋間隔)、本数、コイルの位置関係および通信距離とした。試験ケースを Table 8 に示す。HR1 シリーズでは、通信距離 10m および鉄輪の本数 5 本を固定し、送受信コイルの位置関係を変化させ受信電圧に及ぼす影響について調べた。HR2 シリーズでは、送受信コイルの位置関係、通信距離 10m、鉄輪の本数 5



帯鉄筋軸

Fig. 18 帯鉄筋影響試験の概要

Schematic of testing system for influence of hoop iron on receiving voltage

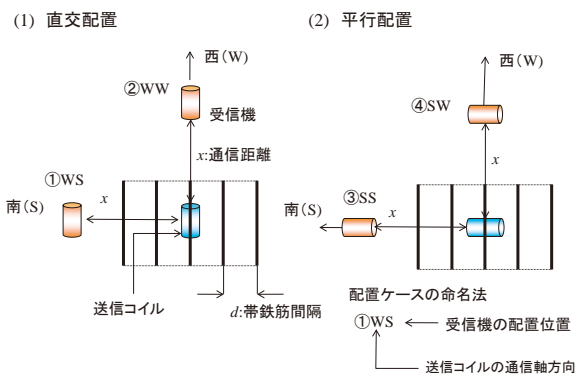


Fig. 19 帯鉄筋と送受信コイルの位置関係

Layout of the transmitting coil, receiving coil and hoop iron

Table 8 帯鉄筋影響試験の試験ケース
Experimental conditions for the influence of hoop iron

試験シリーズ	目的	コイルの大きさ	送受信コイルの位置関係	通信距離	帯鉄筋本数	帯鉄筋間隔 [cm]		
HR1	送信コイルの軸方向と帯鉄筋軸方向の位置関係と減衰の関係を調べる	大	WS WW SS SW	10m (固定)	5	10		
HR2	帯鉄筋間隔、本数と減衰の関係を調べる		WW SS SW				2,5	10, 20, 30, 50
HR3	帯鉄筋の距離減衰を調べる		WW SW					

本を固定し、帯鉄筋間隔を 10, 20, 30, 50cm に広げ、帯鉄筋間隔と受信電圧の関係を調べた。また、SW ケースでは鉄輪の本数を 5 枚から 2 枚に変更した試験を行い、鉄輪の本数と受信電圧の関係を調べた。HR3 シリーズでは、鉄輪の数を 5 本、帯鉄筋間隔 10cm に固定し、受信コイルを 10, 20, 30, 50m 移動させ、帯鉄筋が存在する場合の受信電圧の距離減衰特性を求めた。

(2) 試験結果

試験シリーズ HR1 では送信コイルの設置方向と帯鉄筋軸の位置関係が受信電圧に及ぼす影響を調べた。試験結果を Table 9 に示す。測定値は 1 回の計測結果である。表中の y/y_0 は帯鉄筋を設置する前の初期受信電圧 y_0 で帯鉄筋設置後の測定電圧 y を割った値である。 y/y_0 の値に注目すると、直交配置（送信コイルを帯鉄筋軸方向と直交する方向に向け配置）では、受信電圧は低下しないが、平行配置（送信コイルを帯鉄筋軸方向に向けて配置）では、受信電圧は初期受信電圧の約 1/2 に低下した。

Table 9 帯鉄筋影響試験結果 (HR1)
Receiving voltage (HR1)

試験ケース	①WS	②WW	③SS	④SW
送信コイル配置	直交配置		平行配置	
初期受信電圧 y_0 (鉄筋無し)	120	220	220	120
受信電圧 y	120	220	120	58
受信電圧比 y/y_0	1.00	1.00	0.55	0.48

試験シリーズ HR2 では、帯鉄筋間隔と受信電圧の関係を調べた。試験結果を Fig.20 に示す。測定は 1 回のみである。Fig.20 から Fig.19 の直交配置では、帯鉄筋間隔を広げても受信電圧はほぼ一定であり変化しないことがわかる。一方、平行配置では、受信コイルの配置にかかわらず、帯鉄筋の間隔を狭めると受信電圧は低下する傾向が認められた。

試験シリーズ HR3 の結果を Fig.21 に示す。グラフの値は 2 回の測定の平均値である。受信電圧を y [mV]、通信距離を x [m] とし、最小 2 乗法により y の線型回帰式を求め、以下を得た。決定係数はすべて 0.97 以上であった。

$$\log y = -3.06 \log x + 5.43 \quad (\text{WW}) \quad (10)$$

$$\log y = -2.51 \log x + 4.32 \quad (\text{SW}) \quad (11)$$

c 鉄筋配置による受信電圧低下に関する考察

主鉄筋に関する試験結果より、送信コイルの表面から主鉄筋表面までの距離を 10cm 以上離なせば、送信コイルの設置方向にかかわらず、受信電圧の低下はほとんど

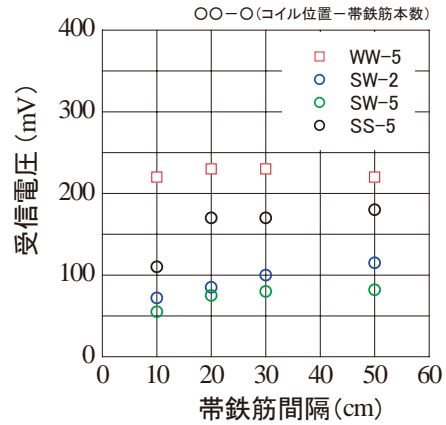


Fig. 20 帯鉄筋間隔と受信電圧の関係
Relationship between the hoop spacing and the receiving voltage

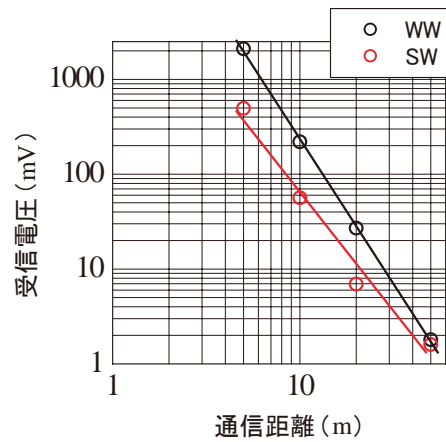


Fig. 21 帯鉄筋が存在する場合の距離減衰特性
Relationship between the transmission distance and the receiving voltage (Under influence of hoop iron)

発生しない。また、鉄筋径および鉄筋長さを変化させても受信電圧低下に及ぼす影響は小さいと推察される。主鉄筋の配置は帯鉄筋のようにコイル状ではないため、磁界の流れを乱す効果はあるが、受信電圧に対する影響は小さいと推察される。

一方、帯鉄筋に関する試験結果からは、送信コイルを帯鉄筋軸方向に向けると受信電圧は帯鉄筋が存在しない場合の約 1/2 に低下することが確認された。また、送信コイルを帯鉄筋軸と直交する方向に向けた場合は受信電圧の低下は認められなかった。すなわち、帯鉄筋軸方向に送信コイルを向けると受信電圧が低下する結果を得た。この結果は、帯鉄筋に送信コイルから発信された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。

帯鉄筋間隔と受信電圧の関係を示した Fig.20 から、帯鉄筋間隔が狭く、本数が多いほど受信電圧は低下することが分かる。帯鉄筋本数が 5 本 (SW-5) と 2 本 (SW-2) の試験ケースを比較すると、帯鉄筋が 2 本と 5 本の場合

での受信電圧の差は20～30%と小さい。このことは、受信電圧の低下に対しては送信コイル近傍に存在する帯鉄筋の寄与が大きいことを示唆する。

9 近接鉄筋による受信電圧低下の検討

a 試験概要および試験ケース

送信コイルに鉄筋が近接した場合、鉄筋に渦電流が発生し、熱エネルギー損失が発生するため、鉄筋を透過する際に低周波電磁波が減衰する可能性がある。そこで、送信コイル表面から鉄筋表面までの距離 L [cm] を試験水準とし、 L と受信電圧の関係を調べた。試験の概要を Fig.22 に示す。また、Fig.23 には送信コイルに対する鉄筋の配置を示す。実際のセンサ設置を想定し、Fig.23 に示すように、LC1：正面、LC2：側面平行、LC3：側面直交の3つの鉄筋配置を設定した。試験では、Fig.22 に示すように送信コイルと受信機の通信軸を一致させ、通信距離 10m と固定し、Fig.24 に示す3種類の鉄筋配置に対して、それぞれ L を変化させ受信電圧との関係を求めた。他の試験水準は鉄筋径（丸鋼： $\phi 13$ 、 $\phi 25$ ）、鉄筋本数（1、2本）を設定した。試験ケースを Table 10 に示す。各試験ケースの命名方法を Fig.24 に示す。試験シリーズと試験水準を組み合わせ命名した。

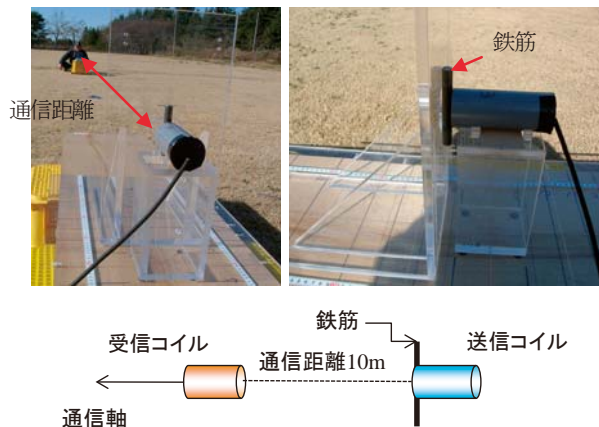


Fig. 22 送信コイル-鉄筋間距離変化試験の概要
Schematic of testing system for the reinforcing bar closing to the transmitting coil

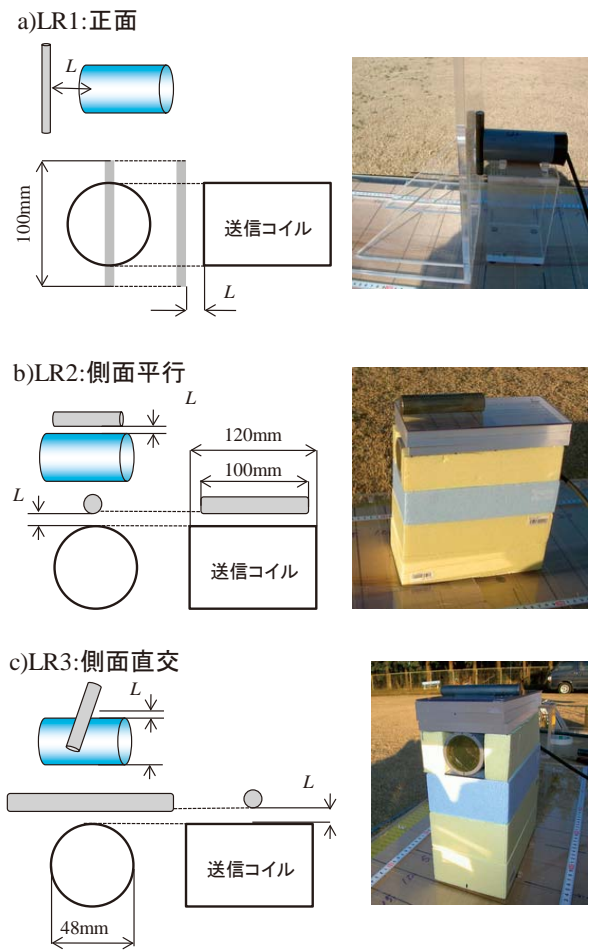


Fig. 23 鉄筋の配置
Layout of reinforcing bar



Fig. 24 試験ケースの命名方法
Symbol of the test cases.

Table 10 試験ケース
Test conditions

試験シリーズ	目的	コイルの大きさ	鉄筋と送信コイルの位置関係	通信距離	鉄筋径	鉄筋数	L [cm]
LR1	鉄筋-送信コイル間距離 L を変化させ受信電圧との関係を調べる	大	正面	10m (固定)	13, 25	1, 2	0 ~ 10
LR2			側面平行				0 ~ 5.2
LR3			側面直交				

b 試験結果

送信コイル-鉄筋間距離 L と受信電圧の関係を Fig.25 ~ 27 に示す。すべての試験シリーズで鉄筋が近接すると受信電圧は低下した。特に L が 1 ~ 3cm 以下の領域で受信電圧は急激に低下した。電圧が急激に低下しはじめる L の値は、側面直交<正面<側面平行の順に大きかった。

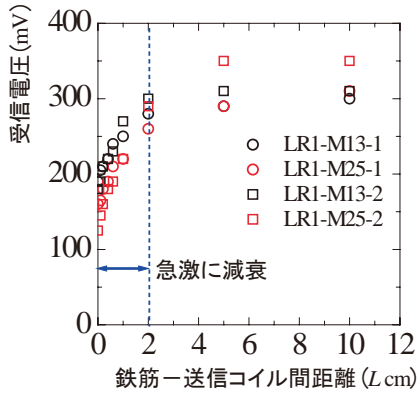


Fig. 25 L と受信電圧の関係 (正面)

Relationship between L and the receiving voltage (front)

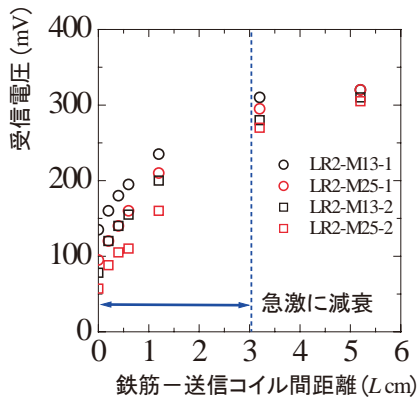


Fig. 26 L と受信電圧の関係 (側面平行)

Relationship between L and the receiving voltage (along side)

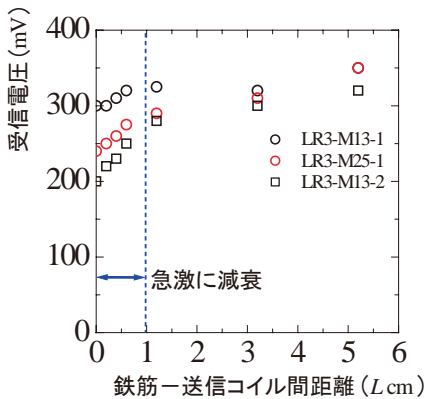


Fig. 27 L と受信電圧の関係 (側面直交)

Relationship between L and the receiving voltage (traverse)

c 近接鉄筋による受信電圧低下に関する考察

送信コイルに鉄筋が近接すると Fig.23 に示したすべての鉄筋配置ケースで L が小さくなるほど受信電圧が低下する結果を得た (Fig.25 ~ 27)。この結果は、送信コイルと鉄筋が近接する際には鉄筋に渦電流が発生し、熱エネルギー損失が生じるため低周波電磁波が減衰するという仮説を支持する。一方、Fig.25 ~ 27 から、受信電圧が急激に減衰しはじめる L の範囲は鉄筋と送信コイルの配置によって異なる結果を得た。このことは、鉄筋と送信コイルの配置により熱エネルギーの損失量が異なる可能性があることを示唆する。すなわち、鉄筋と送信コイルの配置によって鉄筋の渦電流の発生の仕方が異なるため距離 L が同じでも受信電圧の値が異なると考えた。小井戸 (2008) が行った 3 次元有限要素法解析結果によれば、鉄筋に発生する渦電流はコイルの磁束を打ち消す方向に流れる。そこで、鉄筋を送信コイルに対して (1) 正面および (2) 側面平行に設置した場合、Fig.28 に示すような渦電流が発生すると仮定し考察を試みる。

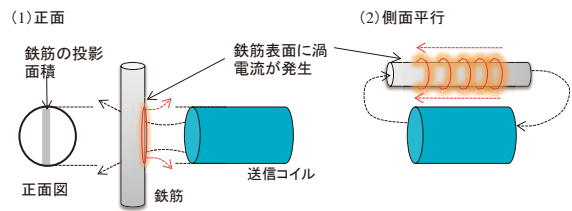


Fig. 28 鉄筋表面に発生する渦電流

Eddy currents produced on the surface of the reinforcing bar

Fig.28 に示すように鉄筋が正面に配置された場合は、電磁界の流れが鉄筋にぶつかる側の鉄筋表面に渦電流が発生すると仮定する。また、鉄筋が側面平行に設置された場合は、鉄筋の表面全体に渦電流が発生すると仮定する。鉄筋配置が正面の場合は、送信コイル断面に鉄筋を投影した面積に電磁界の流れがぶつかると考え、その面積が渦電流の大きさに関係すると考えた。側面平行の場合は、鉄筋を 1 つのコイルと仮定し、鉄筋によって発生する磁界は鉄筋の断面積に関係すると考えた。受信電圧は、渦電流の大きさに比例して低下すると仮定した。以上の仮説を検証するために、受信電圧低下が最大である $L=0\text{cm}$ のケースを対象に、正面配置では鉄筋投影面積の比 ($\phi 13$ の鉄筋のコイル断面への投影面積 A_0 に対する鉄筋径および本数を変化させたケースの投影面積 A の比 A/A_0)、側面平行では鉄筋断面積の比 ($\phi 13$ の鉄筋断面積 S_0 に対する他ケースの鉄筋断面積 S の比 S/S_0) と受信電圧比 ($\phi 13$ 鉄筋 1 本の場合の受信電圧 V_0 に対する各ケースの受信電圧 V の比 V/V_0) の関係を求めた。結果を Fig.29, Fig.30 に示す。Fig.29 から、鉄筋配置が正面の場合、受信電圧比は鉄筋投影面積に比例して減少した。Fig.30 から、鉄筋配置が側面平行の場合、受信電

圧は鉄筋面積比に比例して減少した。ただし、両ケース共に鉄筋の本数が1本と2本の場合では、電圧低下特性に差がみられた。これは、2本の鉄筋間での電磁界の相互作用が要因である可能性がある。以上の結果から、鉄筋が送信コイルに近接する場合の低周波電磁波の減衰は鉄筋の投影面積あるいは断面積と関係することが示唆され、Fig.28 に示した仮説をある程度支持する結果が得られたが、仮説を定量的に説明するまでには至らなかった。近接鉄筋の減衰効果については今後さらに詳細な検討が必要と考える。

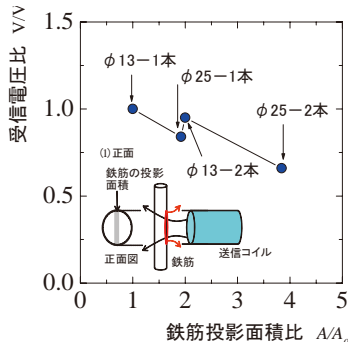


Fig. 29 V/V_0 と A/A_0 の関係 (正面)
Relationship between V/V_0 and A/A_0 (front)

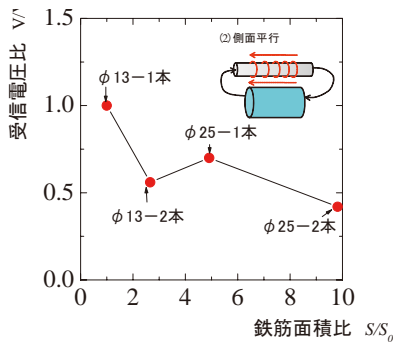


Fig. 30 V/V_0 と S/S_0 の関係 (側面平行)
Relationship between V/V_0 and S/S_0 (along side)

III 埋設試験

a 試験概要

埋設試験の概要を Fig.31 に示す。試験では、送信コイルを $\phi 58\text{cm}$ 、 $H70\text{cm}$ の樽型容器 (200L) の中心に鉄筋と共にコンクリートに埋設し、通信距離を変化させ受信電圧を測定した。試験は、2009年12～1月に農村工学研究所の資材性能試験場で実施した。環境ノイズは概ね 1mV 以下であった。

b 使用機材等

試験では、気中試験と同じ仕様の送信コイルおよび受信機を用いて試験を行った。送信コイルは大を使用した。打設コンクリートには、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 の配合

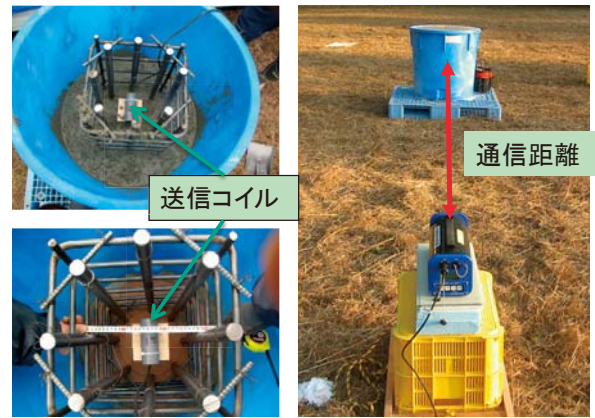


Fig. 31 埋設試験の概要
Schematic illustration of the burial tests

の生コンを使用した。主鉄筋には $\phi 25\text{mm}$ の丸鋼を、帯筋には $\phi 13$ の丸鋼を使用した。配筋図を Fig.32 に示す。 $\phi 25$ の主筋を直径 260mm の円周上に 8 本配筋した。主筋の回りに $\phi 13$ の帯鉄筋を 100mm ピッチで 6 本配置した。鉄筋比は約 1.5% である。

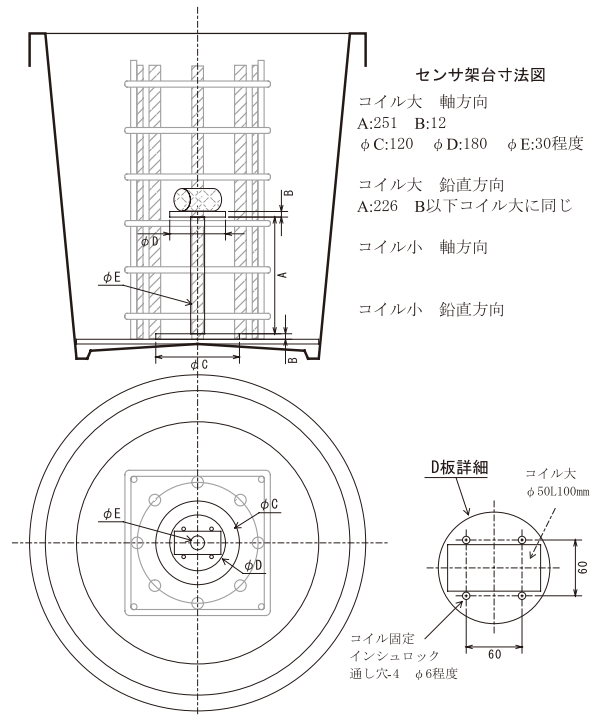


Fig. 32 配筋およびコイルの配置
Arrangement of bar and layout of a transmitting coil

c 試験ケース

送信コイルを帯鉄筋の軸方向に直交させた配置 (CASE1) および送信コイルを帯鉄筋の軸方向を一致させた配置 (CASE2) の計 2 ケースの試験を行った。Fig.33 に試験ケースを、Fig.34 に試験手順および受信電圧の計測時期を示す。鉄筋およびコンクリートの影響が

無いセンサ設置時、鉄筋の影響を調べるための鉄筋立て込み後、コンクリートの影響を調べるためにコンクリート打設1.5時間後および材齢28日において、通信距離を5, 10, 20, 30, 50m変化させ受信電圧を測定した。

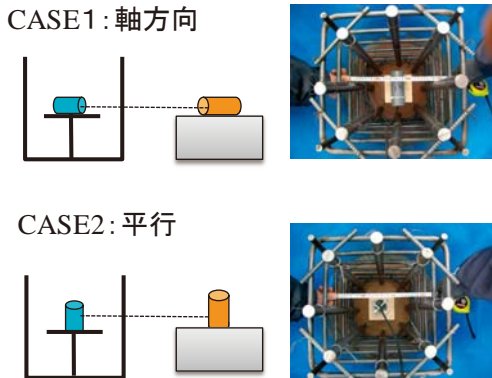


Fig. 33 試験ケース
Test conditions

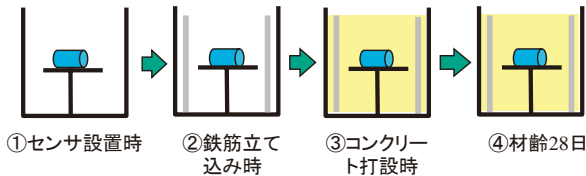


Fig. 34 試験手順
Test process

d 試験結果

試験結果を Fig.35, Fig.36 に示す。グラフの点は、2回の測定の平均値である。受信電圧を y [mV]、通信距離を x [m] とし、最小2乗法により各計測時期における試験値の式 (3) に対する線型回帰式を求め、計測時期ごとの係数 a 、 b を求めた。決定係数はすべて0.98以上であった。係数 a 、 b の値を Table 11 に示す。

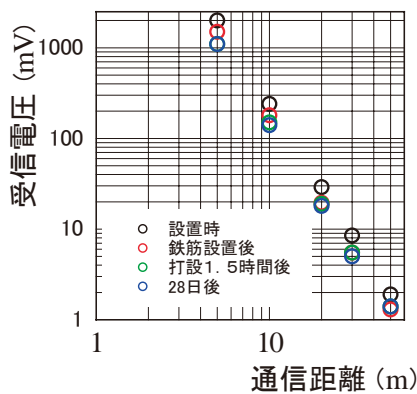


Fig. 35 距離減衰試験結果 (軸直交)
Relationship between the transmission distance and the receiving voltage (orthogonal to axis of hoop)

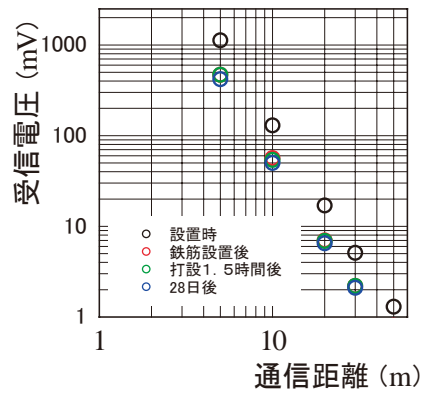


Fig. 36 距離減衰試験結果 (軸方向)
Relationship between the transmission distance and the receiving voltage (Setting in the direction of hoop axis)

Table 11 埋設試験結果
The results of burial tests

試験ケース・係数		センサ設置時	鉄筋設置後	コンクリート打設時	材齢28日
CASE1	係数a	-3.03	-3.09	-2.92	-2.93
	係数b	5.41	5.32	5.08	5.07
CASE2	係数a	-2.95	-2.82	-2.86	-2.81
	係数b	5.08	4.59	4.61	4.54

e 考察

Fig.35 から、送信コイルを軸方向に配置した CASE1 では、鉄筋設置後およびコンクリート打設後に受信電圧が低下した。すなわち、この配置では低周波電磁波は鉄筋およびコンクリートの両方に影響を受け減衰したことが分かる。一方、Fig.36 から、平行配置の CASE2 では、鉄筋設置後に受信電圧は大きく低下し、コンクリート打設後の受信電圧の低下はほとんどない。これは、帯鉄筋により発生する誘導磁界による受信電圧低下に対する影響が大きいと推察される。

Fig.37 に埋設試験における通信距離と受信強度の関係および周辺ノイズレベルを表したグラフを示す。図の CASE1 は帯鉄筋軸と直交する方向に送信コイルを向け試験を行ったケースであり、気中 (鉄筋を設置する前に測定)、鉄筋 (鉄筋設置後)、鉄筋+コンクリート (コンクリート打設後) の3条件に対する通信距離と受信電圧の関係を示した。CASE1 では、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%に低下した。CASE2 は、帯鉄筋軸方向に送信コイルを向けて試験を行ったケースであり、コンクリート打設後の受信電圧は CASE1 の受信電圧の35%まで低下した。これは帯鉄筋の誘導磁界による影響と推定される。CASE1 および CASE2 に関して打設後1.5時間と材齢28日の受信電圧の測定値を比較するとほぼ等しい値を得た。すなわち、コンクリートの材

齢変化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。**Fig.33**の網掛けは周辺ノイズが1mVと仮定した場合、S/N比が2未満となる受信電圧の領域である。グラフの点がこの領域の外にあれば通信可能といえる。グラフから最大通信距離を推定すると、CASE1が45m、CASE2が30mであった。すなわち、周辺ノイズを1mVと仮定した場合、厚さ30cm、鉄筋比1.5%程度の鉄筋コンクリート中から最大30～40mの通信が可能と推察される。

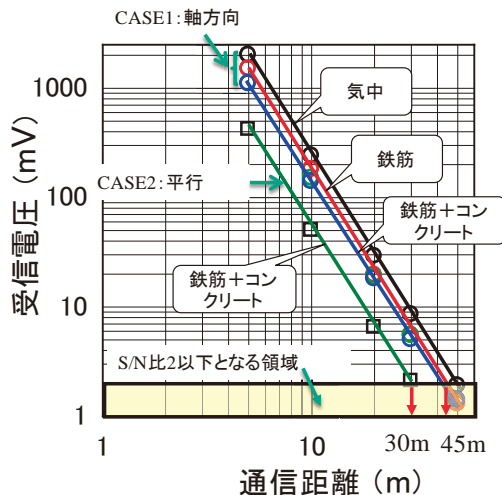


Fig. 37 最大通信距離の推定
Estimation of maximum transmission distance

IV 結 言

本研究では、低周波電磁波の減衰特性を把握するために、①送信コイルを空气中に設置した場合の減衰特性を測定する試験（空中試験）、②送信コイルを鉄筋コンクリートに埋設した場合の減衰特性を測定する試験（埋設試験）を実施した。本試験の範囲内で得られた知見を以下に示す。

1) 空气中における低周波電磁波の受信電圧の対数値と通信距離の対数値の間には線形の関係が成り立つ。

2) 送受信コイルの配置によって低周波電磁波の空中減衰は変化する。これは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ためと推察される。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。送受信コイルの軸が平行の位置関係では通信軸が一致する配置の約1/2に受信電圧は低下する。送受信コイルの通信軸が直角の位置関係では受信電圧は極めて小さくなり、通信を行うことはできない。

3) 主鉄筋による低周波電磁波の減衰効果は小さい。送信コイルの表面から主鉄筋表面までの距離が10cm以上離れれば、受信電圧はほとんど低下しない。また、

鉄筋径、鉄筋長さも受信電圧に影響を与える要因にはならない。

4) 帯鉄筋により低周波電磁波は減衰する。送信コイルと帯鉄筋の軸方向を一致させた配置では、帯鉄筋が存在しない場合の電圧の約1/2に受信電圧は低下する。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。

5) 送信コイルと鉄筋が近接する場合、受信電圧の低下が発生する。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ことが原因と推察される。鉄筋と送信コイルが近接する場合の受信電圧の低下は送信コイル表面と鉄筋表面間の距離Lが3cm以上離れていればほとんど無視できるほど小さい。

6) 厚さ30cm、鉄筋比1.5%程度の鉄筋コンクリート中に送信コイルを埋設し、距離減衰試験を行った。その結果、空气中における初期受信電圧を100%とすると、受信電圧は、鉄筋設置により初期値の75%に、コンクリート打設により初期値の65%に減衰した。打設後1.5時間と材齢28日の受信電圧の測定結果はほぼ等しく、コンクリート材齢の影響は小さいと推察された。周辺ノイズを1mVと仮定した場合、コイルの設置法にも依存するが最大通信距離は30～40mと推測される。

以上述べたように、低周波電磁波を用いた無線通信により鉄筋コンクリート内からの通信が可能であることが供試体試験レベルで実証された。今後は、よりマシブな重力式コンクリートダム等において現場通信実験を行い、ワイヤレス通信の通信限界について検証を行う。また、センサの設置性を検討するための室内試験および施工中の重力式コンクリートダムへの埋設試験を実施する。

参考文献

- 1) 向後雄二, 浅野 勇, 林田洋一, 遠目塚良一(2006): 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, 16(3), 165-176
- 2) 林田洋一, 遠目塚良一, 浅野勇, 増川晋, 田頭秀和(2010): 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, 210, 243-254
- 3) 浅野勇, 林田洋一, 増川晋, 田頭秀和, 遠目塚良一(2009): 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, 209, 163-171
- 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), 158, 55-64
- 5) 杉山央, 大久保孝昭, 中島史郎(2009): 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), 9-14
- 6) 小井戸純司 (2008) : コンクリート中の鉄筋の電磁誘導式非破壊試験に用いる分割型マルチコイルの特性, 日本大学生産工学部研究報告 A, 41(1), 1-6
 - 7) 高村尚, 奥津一夫, 須賀原慶久, 虎田真一郎, 大内 仁 (2006) : 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, 12(1-2), 21-23
 - 8) 黒田清一郎, 中里裕臣, 奥山武彦 (2004) : 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, 202, 205-214
 - 9) スジヨノ, A.S., 関博 (1998) : 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, 20(2), 727-732

Effects of Concrete and Reinforcing Bar on The Wireless Transmission With Low Frequency Electromagnetic Wave

ASANO Isamu, MASUKAWA Susumu, TAGASHIRA Hidekazu and HAYASHIDA Yoichi

Summary

We have developed wireless transducers using a low frequency electromagnetic wave to measure pore water pressure in fill dams. We call them “Wireless Pore Water Pressure Transducers”. This transducer is available to use Structural Health Monitoring (SHM) in reinforced concrete structures because it has no wire cables and it is easy to make the size smaller. However, few studies have been carried out on the communication characteristic of a low frequency electromagnetic wave through reinforced concrete. The aim of this paper is to investigate the communication characteristic of a low frequency electromagnetic wave through reinforced concrete. Some experimental tests were conducted to investigate the effects of concrete and reinforcing bar on the wireless transmission. (1) The attenuation characteristics of a low frequency electromagnetic wave in air. (2) The attenuation effects of electromagnetic waves by reinforcing bar. (3) The attenuation characteristics of a low frequency electromagnetic wave in reinforced concrete specimens.

The results are as follows:

- (1) The received voltage changes by arranging the transmission coil. When the both axes of the transmission and receiving coil are corresponding, the received voltage becomes maximum. When two axes are orthogonal, the received voltage becomes minimum.
- (2) The effect of main reinforcing bar on the attenuation of the low frequency electromagnetic wave is small.
- (3) The hoop attenuates the low-frequency electromagnetic wave when the axis of the transmission coil is corresponding to the axis of hoop axis.
- (4) The low frequency electromagnetic wave attenuates when the reinforcing bar exists within about 3cm by the transmission coil.
- (5) The communication examination was done by setting up the transmission coil in a cylindrical test piece of 60cm in the diameter, steel ratio 1.5%. As a result, it was confirmed a wireless transducer using a low frequency electromagnetic wave was capable of communicating in reinforced concrete structure by the distance of 30-40m.

In conclusion, it was confirmed a wireless communication using a low frequency electromagnetic wave was to communicate in reinforced concrete structure.

Keywords : SHM, A low frequency electromagnetic wave, Reinforcing bar, Concrete, Wireless transmission