

論文 種々の配合のセメント系材料を媒質とした無線タグの通信状態に着目した限界かぶり厚さに関する実験的検討

原 悠也*1・橋本親典*2・渡邊 健*3・石丸啓輔*4

要旨: 無線タグの通信は、空気を媒質することが前提である。しかしながら、著者らは、静電容量型加速度センサを搭載した無線タグが、フレッシュコンクリートが媒質であっても加速度を計測することが可能であることを見出した。ただし、コンクリートのかぶり厚さによって通信遮断が生じるという欠点がある。本研究では、セメント系材料として、コンクリート、モルタル、グラウトを媒質とした場合の無線タグの通信状態に着目し、限界かぶり厚さに関する試験方法を新たに開発した。種々の配合のセメント系材料で実験を実施した結果、コンクリートを媒質にした場合の限界かぶり厚さは 250mm 前後であることが明らかになった。

キーワード: コンクリート, モルタル, グラウト, 静電容量型加速度センサ, 無線タグ, かぶり厚さ

1. はじめに

フレッシュコンクリートの振動締固めに対する長年の未解決な研究テーマの1つに、振動波によってフレッシュコンクリートに伝播される加速度の定量化がある^{1),2)}。

棒状パイプレータによる締固めは、施工者の経験的技量に依存しているのが現状である。土木学会コンクリート標準示方書[施工編:施工標準]の「9.4 締固め」³⁾の【解説】には、『様々な混和材と混和剤の組合せにより、スランプが同じであってもコンクリート配合によって、コンクリートの性状が異なるため、そのフレッシュコンクリートの性状に合った締固め間隔や締固め時間を定める必要がある。』と記述されている。

もし、フレッシュコンクリート中の加速度を計測することができれば、締固め間隔や締固め時間を定量的に評価できると思われる。

これに対して、著者らは、静電容量型加速度センサを搭載した無線タグ複数を用いて、加速度を同時多点計測するシステムを独自に開発した⁴⁾。さらに、振動締固め途中のフレッシュコンクリートから直接、コンクリートに伝播する加速度を計測することに成功した⁵⁾。

ところで、この無線タグの通信は、空気中の通信が前提であり、フレッシュコンクリートを媒質とした通信ではない。偶然にも、コンクリートを媒質として無線通信が可能であるということを見出したに過ぎない。そのため、この無線通信は限界があり、先の実験的研究においてしばしば通信遮断が発生した。同時多点加速度計測システムの信頼性を向上させるためには、通信遮断の条件や限界性能を明確にする必要がある。

本研究では、セメント系材料として、コンクリート、モルタル、グラウトを媒質とした無線タグの通信状態に着目し、限界かぶり厚さに関する試験方法を新たに開発した。種々の配合のセメント系材料で実験を実施した結果、通常のコンクリートを媒質にした場合無線タグでの計測が可能なかぶり厚さの限界は 250mm 前後であり、通常のコンクリート構造物のかぶり厚さに対し十分であった。一方、モルタルやグラウトの限界かぶり厚さは、250mm 未満であった。

同時多点加速度計測システムは、通常のコンクリート構造物のかぶりに充填されるコンクリートの締固め途中の加速の計測は可能であることが明らかになった。

2. 無線タグ

2.1 無線タグの概要

表-1に無線タグの大きさ、無線通信規格を示す。表示のとおり計測器が比較的小さい。そのためコンクリート施工に用いられる鉄筋格子に取り付けコンクリートかぶり周辺の計測が可能である。

表-1 無線タグ規格

寸法 (mm)			無線通信規格
縦	横	高さ	
25	25	10	IEEE802.15.4

写真-1に使用する無線タグ、送受信機、使用電池の外観を示す。また、図-1に無線タグ及び受信機を用いた計測の概略について示す。

USB ポット等で PC と受信機を接続して使う。無線タグはフレッシュコンクリート中に取り付ける。計測を聞

*1 徳島大学大学院 創成科学研究科理工学専攻 博士前期課程 社会基盤デザインコース (学生会員)

*2 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 教授 工博 (正会員)

*3 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 准教授 博(工) (正会員)

*4 徳島大学 技術支援部 常三島技術部門 技術専門職員 (正会員)



写真-1 計測機器の外観

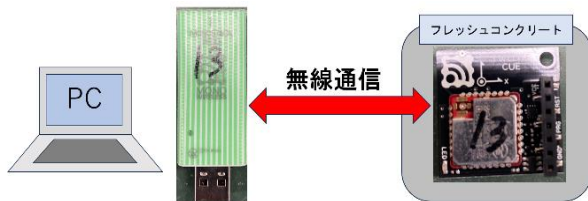


図-1 無線通信の概要

始するとフレッシュコンクリート中で無線タグが計測した加速度データを外に接続した受信機が無線通信を受信する。この受信したデータがPCに記録される。

2.2 無線タグの設定

(1) ソフトおよび環境の準備

計測に使用するノートPCに適合したソフトをインストールしておく。

(2) 無線タグの設定

設定書き込み用USBスティックをPCに接続する。

- 1) チャンネル番号(受信機と対応した番号)
- 2) 送信間隔(送信間隔を0に設定)
- 3) センサの計測周波数(100Hzに設定)

などの設定を行い、それを無線タグに書き込みを行う。

無線タグに電池を装着し動作確認をする。

(3) 計測用プログラム

プログラミング環境を構築し、プログラミング言語のインストールを行い、計測用プログラムを作成した。計測で得られたデータは、CSVファイルとして保存される。このデータは後に記載するデータ処理を行った。

2.3 無線タグの防水処理

無線タグは水に弱い。そのため防水処理を行わなければ、データの通信ができない。図-2に示す防水処理を行った。以下に防水処理の手順を記す。

- (1) ビニールを1辺120mm程度のものを用意する。
- (2) 無線タグを包む。
- (3) 養生テープをビニールで包んだ無線タグの上からできるだけ空間が生まれないように包む。養生テープは2周巻く。
- (4) 先ほど養生テープを巻いた方向から90度回転した方向に養生テープを1周巻く。
- (5) 養生テープを巻いた上に無線タグと対応した数字を記入する。

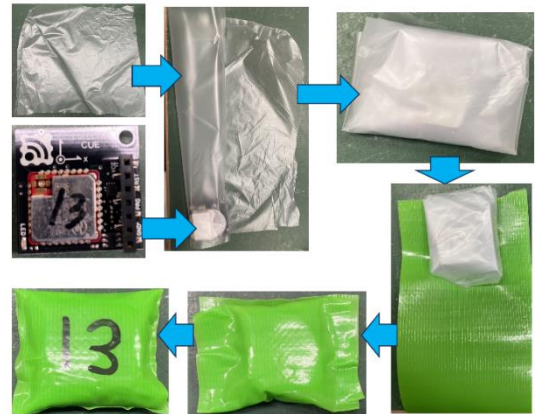


図-2 無線タグの防水処理の過程

なお、養生テープの幅や養生テープの巻く回数での無線通信への影響は小さいと考えるが本研究では、幅50mmとし、合計3回巻くこととした。

3. 使用材料及び配合

今回の実験に使用した使用材料を表-2、配合表を表-3に示す。配合は、W/C47%ではAE減水剤を用い、空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ とした。他の配合ではAE剤を使用していないため空気量は $1.5 \pm 1.5\%$ とした。最初の4行がコンクリート、次の2行がモルタル、最後3行がグラウト(粗・細骨材無し)の配合である。実測はW/C47%で無線通信への影響が認められなかったため、それ以外の配合では、スランプや空気量等のフレッシュ性状の計測を行わなかった。コンクリートはW/C47%のみs/aを47%とし、それ以外のs/aを58%で一定とした。

表-2 使用材料

分類	使用材料	備考
セメント	普通ポルトランドセメント	密度:3.16g/cm ³
細骨材	兵庫県産砕砂	密度:2.58g/cm ³ 粗粒率:2.81
粗骨材	徳島県産砕石1505	密度:2.57g/cm ³ 粗粒率:6.38
	徳島県産砕石2010	密度:2.57g/cm ³ 粗粒率:7.04
混和剤	高性能減水剤	カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物

表-3 配合表

スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)			
				水 W	セメント C	細骨材 S 粗骨材 G	
0	1.5	30	58	112	374	1124	817
8	4.5	47	47	163	345	811	927
8	1.5	50	58	175	350	1050	750
18	1.5	70	58	229	317	980	699
	1.5	50	100	248	496	1489	0
	1.5	70	100	316	451	1353	0
	1.5	30		481	1601	0	0
	1.5	40		552	1379	0	0
	1.5	50		604	1207	0	0

4. 実験方法

4.1 予備実験(媒質:水)

4.1.1 無線タグの個体差の検討

種々の配合を用いた実験を実施する前に、無線タグの

個体差に関する実験を行った。その結果を表-4で示した。表中のタグとは使用した無線タグ、高さは計測試料(今回、水)の底面からの高さ、平均値がかぶり厚さ限度を示す。a, b ではあまり個体差は見られなかった。しかしcでは大きな違いの出る結果となった。受信機側の性能差であるか防水処理による固体差であるのかは不明であるが、個体差があることが明らかになった。この結果より機械の性能差による実験値のずれを少なくするため3つの平均値及び最低値からその試料についての検討を行った。

表-4 無線タグの個体差検討

媒質：水					
3回巻a		3回巻b		3回巻c	
タグ	高さ(mm)	タグ	高さ(mm)	タグ	高さ(mm)
a	166	a	160	a	169
b	140	b	149	b	146
c	134	c	160	c	179
平均	147	平均	156	平均	165

4.1.2 養生テープによる無線通信への影響

防水処理として巻いている養生テープの無線通信への影響を実験した結果を表-5に示す。同一個体の無線タグを養生テープの巻く回数を3回、6回、9回と変化させた。個別の高さの変動は大きかった。しかしながら、巻く回数とかぶり厚さ限度との傾向はないと判断できた。また、無線タグ3つのデータを平均すると同程度の値であった。したがって、養生テープによる巻き回数の影響は小さいと判断した。

表-5 養生テープによる無線通信への影響

媒質：水					
3回巻		6回巻		9回巻	
タグ	高さ(mm)	タグ	高さ(mm)	タグ	高さ(mm)
a	166	a	152	a	171
b	140	b	100	b	151
c	134	c	176	c	125
平均	147	平均	143	平均	149

4.2 実験器具

無線タグを適用可能な限界かぶりを実験的に検討するための図-3に示す装置を制作した。

- (1) 長さ 700mm 直径 200mm 程度の塩化ビニール管
- (2) 塩化ビニール管用キャップ
- (3) 箱(錘用のコンクリートを充填するため)
- (4) コンクリート(水の浮力に対抗するため)
- (5) 樽容器
(容器の最低直径 600mm, 高さ 800mm を超える物)
- (6) 鉄板
(錘用コンクリートと塩化ビニール管を定着する)
- (7) ボルト(塩化ビニール管と鉄板を固定するため)



写真-2 塩化ビニール管の補強



写真-3 樽容器



写真-4 塩化ビニール管内部



写真-5 受信機の設置

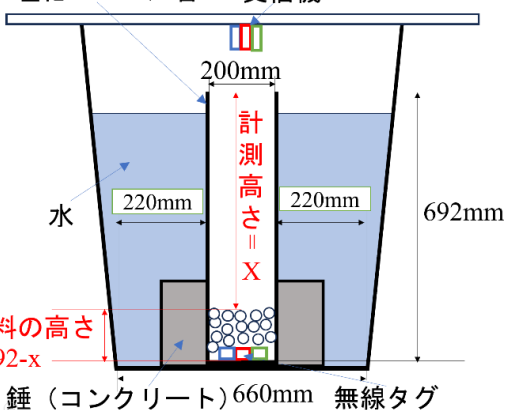


図-3 実験装置の概要

実験の観察を行うため、直径 200mm の塩化ビニール管、対応したキャップを箱のサイズの鉄板とボルトで定着させる。制作したものを箱に入れ箱にコンクリートを充填させる。実験では塩化ビニール管の外に多量の水を用いるためその浮力に対応するため、制作した器具を写真-3の樽容器の中心になるように置く。写真-3の樽容器は直径の最低値が 600mm を下回らないようにする。本実験前の予備実験 4.1 より無線タグは水の厚さが 200mm で通信が途切れた。よって側面から出る通信を、水で遮断するために側面の水の厚さは 200mm を確保するようにした。作成した塩化ビニール管の中に写真-4のように無線タグを設置し、写真-5のように受信機を塩化ビニール管上に設置した。完成図の概略を図-3に示す。

4.3 計測方法

今回の試験での計測方法を以下に示す。

- (1) 無線タグと電池を接続し起動し、PC と接続した受信機との通信状態を確認する。
- (2) 無線タグの防水処理を行う。
- (3) 防水処理した無線タグを 3 つ塩化ビニール管底面に養生テープで固定し、計測毎で固定位置が変化しないように設置する（写真-6 参照）。



写真-6 無線タグの設置方法 写真-7 試料投入後

- (4) プログラムを作動させ計測を開始すると同時に、計測開始からの時間も記録する。
- (5) 塩化ビニール管上面からハンドスコープ等を用いて計測試料を投入していく。
- (6) おおよそ塩化ビニール管の 50mm 程度を目安に試料を投入するごとに突き棒を用いてならす。
- (7) メジャーを用いて図-3 の計測高さを計測する。同時に実験開始からの時間も記録する。
- (8) 受信できる無線通信が完全に途切れるまで、上記の(5)~(8)を繰り返し行う。
- (9) プログラムを終了し計測結果を CSV ファイルで保存し、ファイル名を適宜変更する。

試料の高さは、塩化ビニール管の全長(今回 692mm)から計測高さを引いたものとする（図-3 参照）。この試料高さが、実際のコンサート構造物のかぶり厚さを想定している。

5. データの整理

図-4 に実験結果の一例を示す。無線タグごとに分けて時間ごとに 10Hz でデータを受信し、受信した点を記録し点を打点し点描した直線群である。本来、横軸は計測開始後からの時間が表示される。通信信号が得られている時間に対応する試料高さまで通信可能という意味である。左端が起点であり、もし最大 692mm まで通信可能で

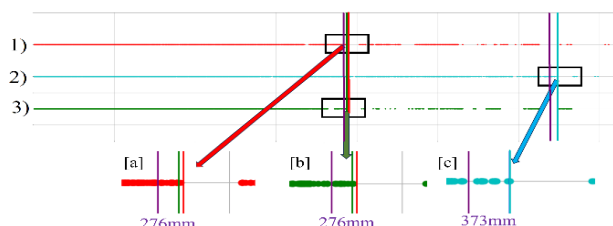


図-4 データ整理方法

あれば右端は 692mm を意味する。実際には 692mm 以前に通信遮断が起こるため、右端は 692mm よりも短い。

つまり、通信遮断までに記録した時間を基に試料の高さが決定することになる。

実験では 1 度の計測に 3 つの無線タグを用いたため、その結果を 1), 2), 3) で表示した。無線通信を用いているため、時折通信が短時間途切れ、またすぐ伝わることもある。本研究では初めて 10 秒間連続して無線通信が途切れるまでを適用可能なかぶり厚さと定めた。この理由は間違いなく一度完全に通信が途切れたと判断するため、今回の実験では 10 秒とした。

図-4 の[a][b][c]は、点描した直線の通信遮断近傍を拡大した図である。無線タグ 1)は赤の縦線、無線タグ 2)は青の縦線、無線タグ 3)は緑の縦線の地点を意味し、無線タグでのかぶり厚さ(それより右側は通信不可)である。紫の縦線は実験時に計測した地点での試料の高さである。

図-4 の例では、1)が 276mm, 2)が 276mm, 3)が 373mm となった。この 3 つの値の平均値をその試料での無線タグのかぶり厚さ限度(図-4 の例では 308mm)とした。また、その配合条件で区別せず計測した試料の中で最もかぶり厚さが小さかったものを最低限、無線タグの作動が確認できる安定的かぶり厚さと定めた。この安定的かぶり厚さ内に無線タグが存在した場合、無線通信が可能と判断できる。すなわち、実現場での計測の限界かぶりとなる。

6. 結果及び考察

6.1 種々の配合の無線タグのかぶり厚さ限度

表-6~表-9 までの表では、同一試料のかぶり厚さの最低値(安定的かぶり厚さ)を黄色で強調表示している。またかぶり厚さ限度を平均値と表示している。

(1) コンクリートのスランプによる違い

図-5、図-6、表-6 にコンクリートのスランプによる無線タグの無線通信の影響の結果を示す。スランプ 8.5cm のコンクリート作製、スランプロスさせ、スランプ 2.5cm のコンクリートも作製しこの 2 種類の計測を行った。

両図より無線通信への影響はあまりないと判断できた。3 つのかぶり厚さ限度(平均値)の違いは 5mm 程度と非常に小さい結果となった。

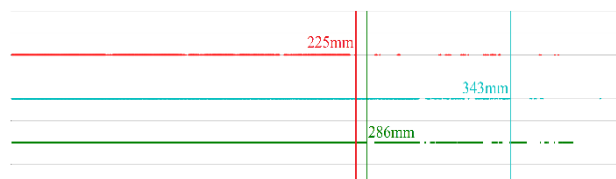


図-5 s/a=47%, W/C=47%, スランプ 8.5cm コンクリート

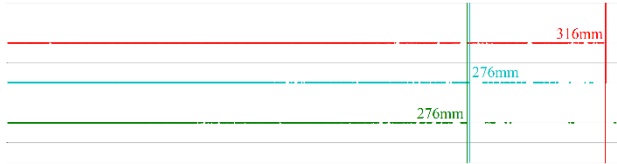


図-6 s/a=47%, W/C=47%, スランプ 2.5cm のコンクリート

表-6 s/a=47% W/C=47 のコンクリートでの比較

W/C=47%コンクリート			
スランプ8.5cm		スランプ2.5cm	
タグ	高さ(mm)	タグ	高さ(mm)
a	225	a	316
b	343	b	276
c	286	c	276
平均	285	平均	289

(2) コンクリートの W/C による違い

図-7～図-9, 表-7 に s/a=58%と一定としコンクリートを W/C=30%, 50%, 70%と変化させた結果を示す。表-7 より W/C でかぶり厚さ限度の違いは 25mm 程度とかぶり厚さ限度の値の 1/10 以下である。またどちらかにか傾いた傾向も見られないことからコンクリートの W/C の違いは無線通信にはあまり影響がないことが分かった。またコンクリートの無線タグのかぶり厚さ限度は 280～310mm 程度で安定的かぶり厚さは 225mm となった。

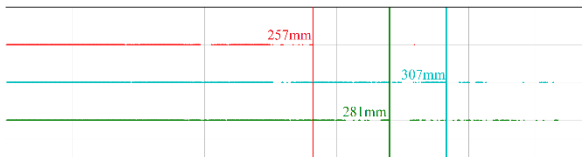


図-7 s/a=58%, W/C=30%のコンクリート

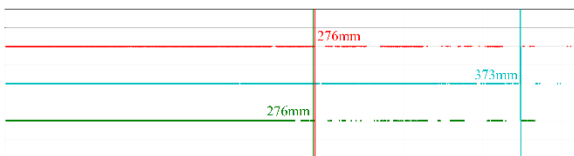


図-8 s/a=58%, W/C=50%のコンクリート

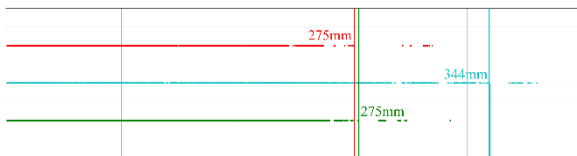


図-9 s/a=58%, W/C=70%のコンクリート

表-7 s/a=58%のコンクリートの W/C による違い

コンクリート					
W/C=30%		W/C=50%		W/C=70%	
タグ	高さ(mm)	タグ	高さ(mm)	タグ	高さ(mm)
a	257	a	276	a	275
b	307	b	373	b	344
c	281	c	276	c	275
平均	282	平均	308	平均	298

(3) モルタルの W/C での違い

図-10, 図-11, 表-8 でモルタルの W/C を 50%, 70%と変化させた結果を示す。表-8 より個別にみると無線タグ a のみが大きく異なる。他の値は比較的近い値である。かぶり厚さ限度の差は 25mm であり 1/10 程度の違いであった。同 W/C のコンクリートと比較するとかぶり厚さ限度が 40~60mm 程度小さくなった。粗骨材の有無による影響があると考えられる。

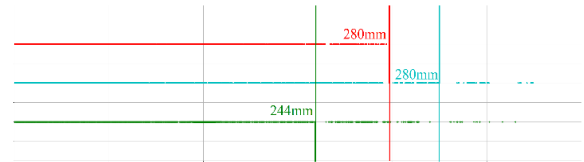


図-10 W/C=50%のモルタル

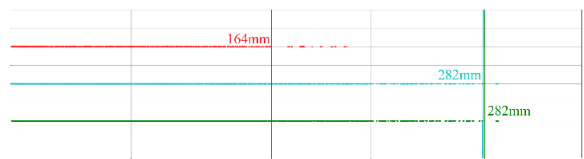


図-11 W/C=70%のモルタル

表-8 モルタルの W/C による違い

モルタル			
W/C=50%		W/C=70%	
タグ	高さ(mm)	タグ	高さ(mm)
a	280	a	164
b	280	b	282
c	244	c	282
平均	268	平均	243

(4) グラウトの W/C での違い

図-11～図-13, 表 9 にグラウトの実験結果を示す。表-9 より W/C=40%の時ではかぶり厚さ限度が大きくなっていた。その差は値の 1/4 程度とこれまでのコンクリート, モルタルとは違い大きな変化が出た。これは配合における水の割合が大きい。そのため試料の粘性や状態が大きく変化した。W/C=50%では試料が水のような状態であり, W/C=30%では粘土のような状態であり, 密実に充

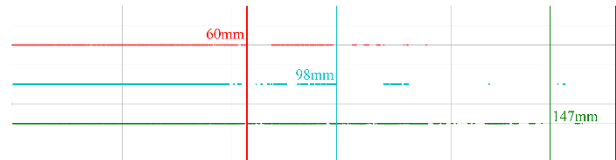


図-11 W/C=30%のグラウト



図-12 W/C=40%のグラウト

表-9 グラウトのW/Cによる違い

グラウト					
W/C=30%		W/C=40%		W/C=50%	
タグ	高さ(mm)	タグ	高さ(mm)	タグ	高さ(mm)
a	60	a	131	a	89
b	98	b	131	b	103
c	147	c	133	c	110
平均	102	平均	132	平均	101

填され無線通信が伝わりにくくなったと考える。グラウトのかぶり厚さ限度は 100~130mm 程度とコンクリートの 1/3 程度安定的かぶり厚さは 60mm とコンクリートの 1/4 程度と非常に小さい値となった。この結果および(3)のモルタルでの結果と合わせて細骨材と粗骨材がフレッシュコンクリート中で無線タグの無線通信が伝わる原因になっているのではないかと考えられる。

6.2 考察

6.1 の実験結果から、コンクリートの W/C やスランブではかぶり厚さ限度はあまり変化しなかった。一方、骨材量によって、かぶり厚さ限度は増加した。

図-14 に W/C=50%での骨材の有無が無線通信への影響を表すものとしてグラウト、モルタル、コンクリートの結果を比較表示した。コンクリート中で無線通信のかぶり厚さ限度が変化する大きな要因はコンクリート中で骨材の単位量や s/a によるものであると考えられる。

この原因は粗骨材によってコンクリートに空隙が生まれる。粗骨材と細骨材が無線通信の誘導体となりコンクリートのかぶり厚さ限度が大きくなると考えられる。

また、コンクリート中で無線タグの安定的かぶり厚さは 225mm であり 200mm より大きかった。一般のコンクリート構造物の最小かぶりは 200mm 前後である。したがって、施工現場でのコンクリート型枠のかぶり厚程度の無線通信は可能であることが確認できた。

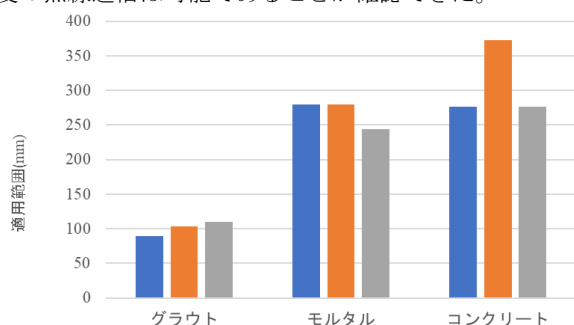


図-14 骨材の有無がかぶり厚さ限度に与える影響

7. 結論

本研究の範囲内で明らかになったことを以下に記す。

- (1) 無線タグは防水処理による無線通信への影響はほとんどないが個体差があるため使用時には3つ程度

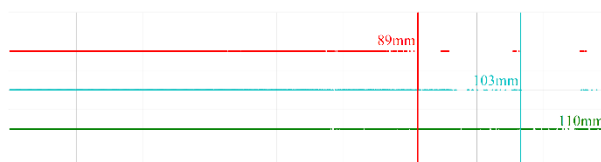


図-13 W/C=50%のグラウト

同時に計測しその結果を平均するのが良い。

- (2) コンクリートをはじめとする建設材料では W/C 及びスランブによる無線通信への影響は小さい。グラウトでのみで W/C による変化が見られた。
- (3) コンクリートでは骨材量や s/a によって無線通信の通信可能なかぶり厚さに大きな影響を及ぼす。骨材粒子が混入されることで、コンクリート中の空隙や骨材粒子が無線通信の誘導体になるためであると考えられる。
- (4) 本研究で用いた無線タグの限界かぶりは 225mm であった。したがって、同時多点加速度計測システムは、通常のコンクリート構造物のかぶり厚さ程度であれば無線タグの通信は可能であると考えられる。

謝辞：本研究の一部は、基盤研究(C)22K04264 の助成を受けて実施したものである。ここに付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 村田二郎ほか：コンクリート施工設計学序説，技報堂出版，pp.145-151，2004
- 2) 梁俊，丸屋剛，坂本淳，松元淳一，下村泰造，滝沢正徳：鉄筋間隙を通過するコンクリートにおける締固めエネルギーに基づいた締固め性に関する研究，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，52 Vol.75，No.2，pp.142-156，2019.2
- 3) 土木学会コンクリート委員会編：「9.4 締固め」，2023 年制定コンクリート標準示方書[施工編：施工標準]，pp.122-124，2023.9
- 4) 藤原京介，山地功二，橋本親典，渡邊健：振動締固め途中のフレッシュコンクリートに伝搬される加速度を対象とした加速度センサ付き無線 IC タグを用いた計測システムの開発，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.77，V-117，2022.9
- 5) 渡邊智寛，藤原京介，橋本親典，渡邊健：静電容量型加速度センサ内蔵無線 IC タグを用いた締固め途中においてフレッシュコンクリートに伝播する加速度の計測，コンクリート工学年次論文集，Vol.45，No.1，pp.718-723，2023.7