

論文 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

渡邊 智寛*1・藤原 京介*2・橋本 親典*3・渡邊 健*4

要旨：著者らは振動締固めによって型枠内に流動していくフレッシュコンクリート内部の挙動を観察・記録する計測方法として、Wi-Fi とシングルボードコンピュータと静電容量型加速度センサを組み合わせ、伝播された加速度を無線通信で直接計測するシステムを開発した。しかしながら、シングルボードコンピュータとセンサの間は有線であった。これを無線化するために、同型加速度センサを内蔵した無線 IC タグを用いた同時多点計測システムを開発した。かぶりコンクリートにある格子状鉄筋の内外の加速度の減衰や加速度に与えるスランプの影響を検討するために、模擬型枠による締固め実験を行い、伝播加速度の計測を行った。

キーワード：振動締固め、フレッシュコンクリート、加速度、模擬型枠、静電容量型加速度センサ

1. はじめに

通常、現場でのコンクリートの締固めには内部振動機が用いられる。挿入する間隔、振動を加える時間によってコンクリートの品質が決定される。締固めが不十分な場合、施工欠陥の発生や耐久性などを損なう。過剰な振動はブリーディングを生じさせ、コンクリートの品質を低下させる。そのため、適切な時間及び挿入間隔で締固めを行うことは構造物の品質を確保するうえでとても重要である。

しかしながら、コンクリート標準示方書では締固め作業の目安が記載される程度にとどまっている。コンクリートの締固め作業の際の内部振動機の挿入時間や挿入間隔は十分な管理が行われておらず、実際の現場では、内部振動機は現場作業員の経験と判断にゆだねられている。

この問題を解決するためには、抽象的な表現ではなく定量的に評価する手法の開発が必要である。著者らの研究室では、数年前から、近年の IT や IoT といったテクノロジーを導入して、加速度計測システムによる締固めの定量化の開発を試みている¹⁾²⁾。Wi-Fi とシングルボードコンピュータを用い、計測を無線化したシステムである。しかしながら、加速度センサとシングルボードコン



図-1 加速度計測システムの概要

ピュータの間が有線であるため、流動するフレッシュコンクリートの流れによって加速度センサが大きく移動するという欠点があった。写真-1に参考文献¹⁾²⁾で用いたシングルボードコンピュータと加速度センサの計測装置の概観を示す。

この欠点を改善するために、本研究では、図-1に示す計測システム全体を完全に無線化するシステムを提案した。静電容量型加速度センサ付き無線 IC タグ（以後、無線 IC タグと称す）を用いた手法である。なお、加速度センサ自体は、Wi-Fi とシングルボードコンピュータを用いたシステムで用いられたものと同規格で同性能である。

本研究の目的は、Wi-Fi とシングルボードコンピュータを用い、計測を無線化したシステムでの模擬型枠を使った締固め実験で得られた知見²⁾の妥当性の確認である。すなわち、フレッシュコンクリートに伝播される加速度は、かぶり部における鉄筋の存在によって減衰しないということと、スランプに依存しないということに対して、実験的に検討した。

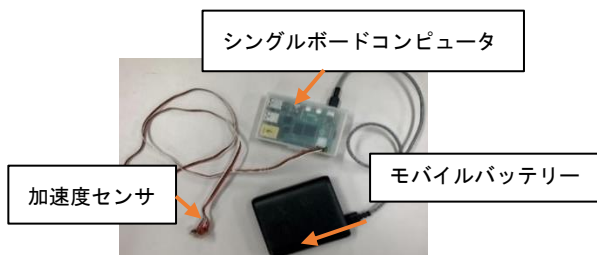


写真-1 シングルボードコンピュータ、モバイルバッテリーと加速度センサ¹⁾

2. 無線加速度計測システム

センサ部分の無線化として無線 IC タグを検討した。

*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 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)

*3 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 社会基盤デザイン系 教授 工博 (正会員)

*4 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 社会基盤デザイン系 研究教授 博 (工) (正会員)

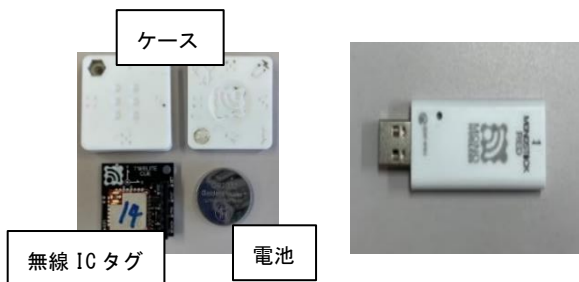


写真-2 無線 IC タグ 写真-3 USB スティック

写真-2 に加速度センサを内蔵する無線 IC タグ、写真-3 に USB スティックを示す。無線 IC タグは、3 軸の加速度センサを搭載したものであり、USB スティックと世界標準規格の IEEE802.15.4 を使って通信を行う。ノート PC から USB スティックを介してコマンドおよびデータを送受信し計測を行った。写真-2 にある白いケースの大きさは、30mm×30mm×10mm である。電池を装着した無線 IC タグを格納する。本実験では、フレッシュコンクリート中で使用するため、この白いケースを養生テープで巻き付けた。

3. 実験方法

3.1 使用材料および配合

使用材料の物性値を表-1、コンクリートの配合を表-2、フレッシュ性状の結果を表-3 に示す。配合は普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比は 47%、細骨材率は 47%とした。目標スランブは 12cm となっているが、スランブの大きさに対する伝搬する加速度の変化を検討するために、スランブを変化させて実験を行った。スランブに与える配合要因は種々ある。本実験では、単位水量や s/a の影響を排除し、モルタルの粘性のみの影響を検討するために、材料構成はそのままとし、スランブロスによってモルタルの粘性を変化させスランブを変化させた。

実験は 3 日間に分けて行い、それぞれ 3 回の締固め実験を行い合計 9 回の加速度データを取得した。

表-1 使用材料の物性値

分類	記号	使用材料	備考
セメント	C	普通ポルトランドセメント	表乾密度：3.16g/cm ³
細骨材	S	兵庫県産砕砂	密度：2.58g/mm ³ 、粗粒率：2.83 吸水率：1.61%
粗骨材	G1	徳島県産砕石 1505	表乾密度：2.57g/mm ³ 、粗粒率：6.39 吸水率：1.61%、粒径：5-15mm
	G2	徳島県産砕石 2010	表乾密度：2.57g/mm ³ 、粗粒率：7.08 吸水率：1.61%、粒径：10-20mm
混和剤	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系の複合体
	AE	AE剤	ポリアルキレングリコール誘導体

表-2 コンクリートの配合

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)					目標 スランブ値 (cm)
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材G		
					G1	G2	
47	47	165	350	823	555	386	12±2.5

表-3 フレッシュ性状の一覧表

実験日	混和剤 (P*%)		計測 (回目)	SL (cm)		Air (%)	C.T. (°C)
	SP	AE		スランブ	フロー		
1日目	0.65	-	1	23.0	38	3.2	18.3
			2	16.5	-	3.2	18.6
			3	15.5	-	3.2	18.4
2日目	0.5	0.002	1	18.5	-	4.0	18.0
			2	3.0	-	4.0	17.8
			3	16.0	-	4.0	17.3
3日目	0.55	0.003	1	20.0	-	5.8	19.3
			2	18.0	-	2.8	19.3
			3	5.0	-	2.3	19.0

3.2 模擬型枠締固め試験

写真-4 に内部振動機、写真-5 に模擬型枠の全体像、写真-6 に無線 IC タグ設置方法、表-4 に内部振動機の性能の規格、表-5 に模擬型枠の配筋条件を示す。模擬型枠は、格子状鉄筋を配置し、高密度配筋の構造物を模擬した木製の充填容器である。打込む試料は 60L とし、模擬型枠内に深さ 200mm 以上充填できる量とした。また、かぶり面を透明枠として充填状況が目視確認できるものとした。無線 IC タグは網状のナイロン製袋に入れ



写真-4 内部振動機



写真-5 模擬型枠



写真-6 無線 IC タグ設置方法

表－4 内部振動機の性能

型式	出力 (W)	電圧 (V)	電流 (A)	周波数 (Hz)	振動数 (Hz)
HBM50VA	400	48	9	200/240	200/240
全長 (mm)	振動部 (径×長mm)	外部ホース (径×長mm)	質量 (kg)		
6539	52×385	36×6000	16.1		

表－5 配筋条件

主鉄筋の配置	D25, 鉄筋間隔100mm, 型枠までの距離75mm
帯鉄筋の配置	D19, 鉄筋間隔60mm
有効鋼材量	675kg/m ³
かぶり	53.5mm
最小あき	41mm

て、格子状鉄筋に括り付けた。模擬型枠内の内部振動機の挿入位置付近にスコップを用いてコンクリート約 60L を静かに打ち込んだ。その後、内部振動機を所定の位置に挿入し、模擬型枠内に打ち込んだコンクリートが模擬型枠内の底面から 200mm の位置に到達するまで加振を行うとともにコンクリート内部の加速度の測定を行った。

3.3 データ処理

計測したデータのサンプリング間隔は 800Hz である。式(1)で計算を行い、合成加速度を求めた。データ処理およびグラフ作成には、プログラミングがやりやすいため Google Colaboratory を使用した。

なお、この加速度を求めるシステムや計算方法の妥当性に関しては、既に参考文献⁹⁾で発表しているので本論文では省略する。

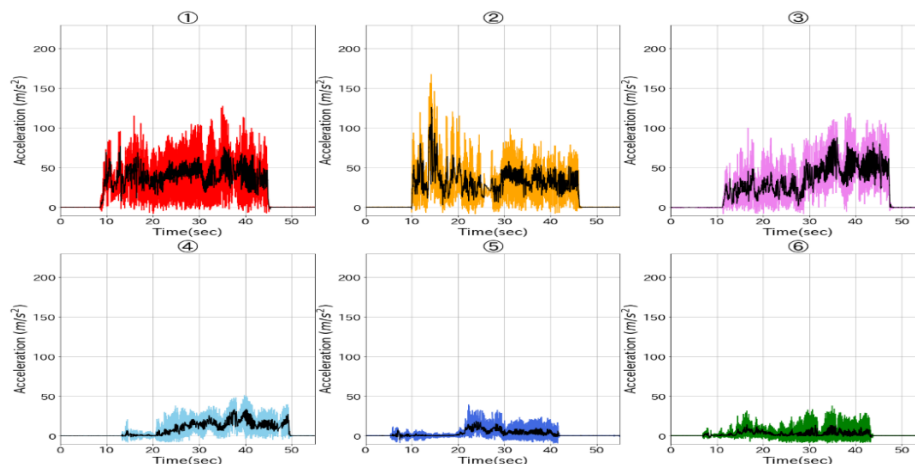
$$\text{合成加速度} = \sqrt{\text{accx}^2 + \text{accy}^2 + \text{accz}^2} - g \quad (1)$$

accx : x 軸方向の加速度 (m/s²)

accy : y 軸方向の加速度 (m/s²)

accz : z 軸方向の加速度 (m/s²)

g : 標準重力加速度 (m/s²)



図－3 第1日目のスランブ 23cm における結果

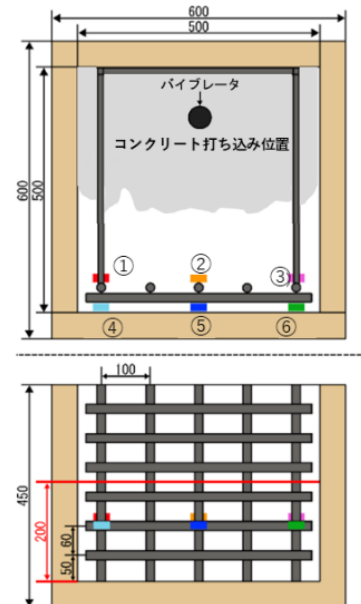
4. 実験結果

3 日間の無線 IC タグの設置位置の番号はすべて異なる。したがって、日にち別に設置位置の番号を示し、スランブごとの加速度の時系列データを示す。時系列データの黒い実線は 10 点ごとの移動平均を意味する。データの色は、無線 IC タグ設置位置の色に対応する。シングルボードコンピュータと加速度センサを有線で接続した池澤ら²⁾の実験結果と同様に、加振直後から加速度が急激に立ち上がる挙動が計測された。

4.1 第1日目の結果

図－2 に無線 IC タグの設置位置、図－3 に第1日目の結果の一例としてスランブ 23cm での計測結果を示す。

スランブ 23cm の計測では、格子状鉄筋外側の 3 つの無線 IC タグの取り付けがあまくコンクリートの打込表面まで浮いてきた。そのため、加速度が非常に小さくなったと考えられ考察のデータから外すこととした。



図－2 第1日目の無線 IC タグの設置位置

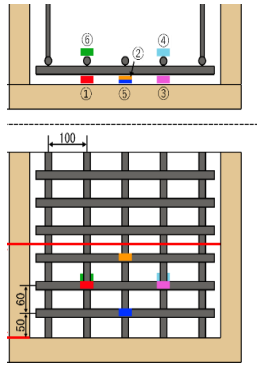


図-4 第2日目の無線 IC タグの設置位置

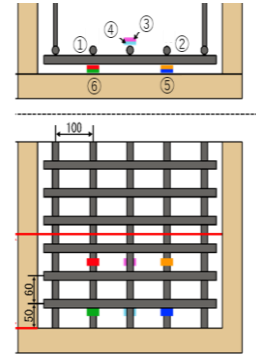


図-6 第3日目の無線 IC タグの設置位置

4.2 第2日目の結果

図-4 に無線 IC タグの設置位置（なお、平面図は格子状鉄筋の部分のみを示す）、図-5 に第2日目の結果の一例としてスランプ 18.5cm での計測結果を示す。

②のデータは、設置位置がコンクリートの打込表面まで移動（浮上）した可能性があった。そのため加速度自体の値が非常に小さく計測できていないと判断され考察のデータから外すこととした。

4.3 第3日目の結果

図-6 に加速度センサの設置位置（なお、平面図は格子状鉄筋の部分のみを示す）、図-7 に第3日目の結果の一例としてスランプ 20.0cm での計測結果を示す。

④のデータは、無線 IC タグの不調によりうまく計測できなかった。

5. 考察

9回の締固め実験における無線 IC タグの経過時間に伴う加速度データの統計値として、加振開始直後から終了時間内の加速度の平均値、標準偏差および変動係数を求めた。表-6 にこれらの実験結果を一覧表として示す。

スランプごとの加速度の平均と標準偏差は、加速度の時系列データの統計値として、6 か所のセンサ別に、加振開始から加振終了時の加速度 10 点ごとの移動平均を取った数値から求めた。つまり、各計測結果に表示されている黒い実線の値の平均と標準偏差を求めた。

ただし、1日目のスランプ 23cm の④、⑤、⑥、2日目における②、3日目における④のデータは、表-6 のスランプごとの加速度の平均のデータには含まれていない。

図-8 にスランプごとの加速度の平均と変動係数を示す。赤が格子状鉄筋の内側、青が格子状鉄筋の外側を測

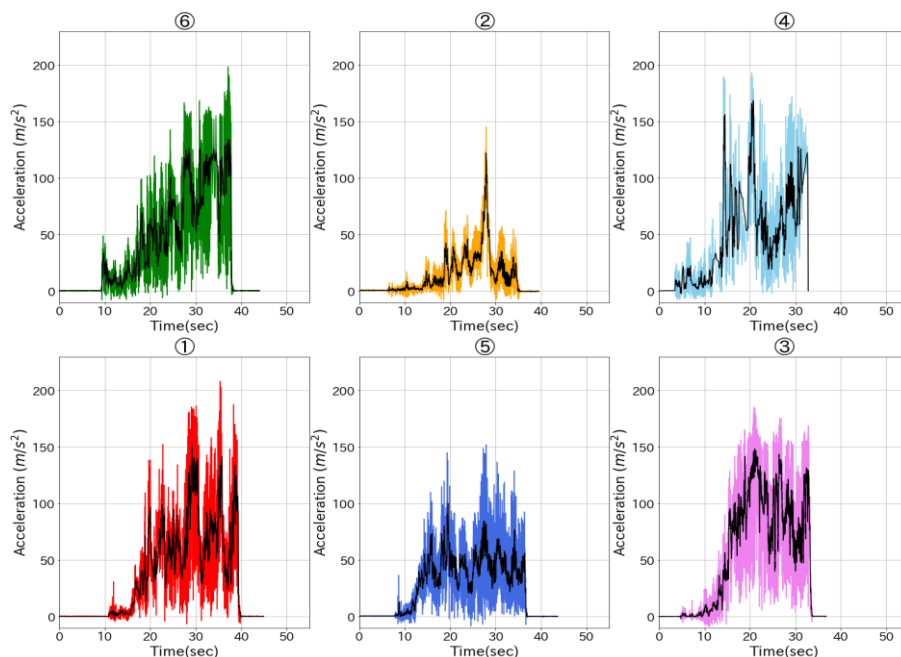


図-5 第2日目のスランプ 18.5cm における結果

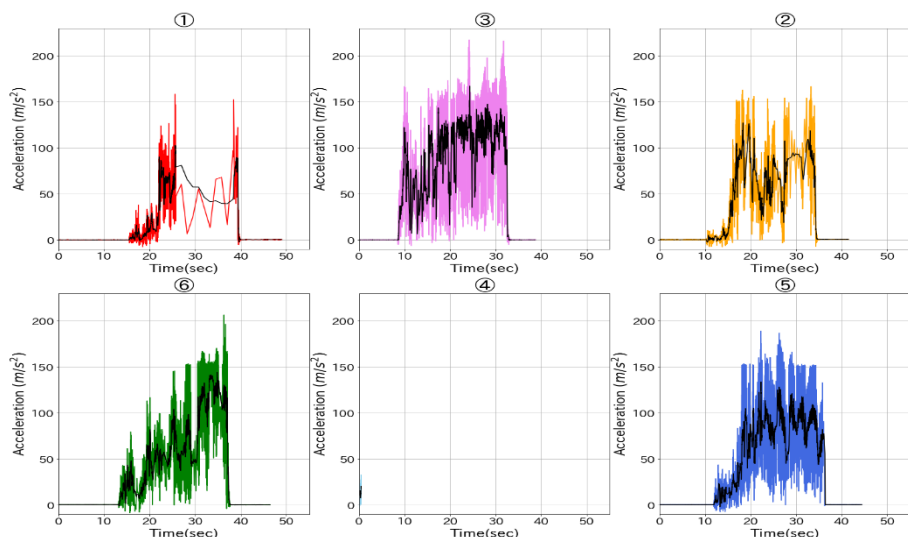


図-7 第3日目のスランプ20.0cmにおける結果

表-6 実験結果の一覧表

実験日	スランプ cm	無線ICタグ の番号	平均値 m/s ²	標準偏差 m/s ²	変動係数 %	データ数	計測時間 s
第1日目	23.0	①	40.8	11.0	26.9	1926	37.9
		②	34.7	14.6	42.2	1663	
		③	37.8	17.4	46.1	2089	
		④					
		⑤					
		⑥					
	16.5	①	57.7	15.1	26.3	2229	32.6
		②	47.8	20.5	42.9	1607	
		③	42.3	20.0	47.4	2646	
		④	34.1	13.1	38.4	1986	
		⑤	34.9	12.0	34.2	1959	
		⑥	56.1	18.5	32.9	1667	
	15.5	①	42.7	17.4	40.8	2572	39.9
		②	51.6	20.8	40.4	1192	
		③	75.9	24.1	31.8	3090	
		④	32.9	17.9	54.4	663	
		⑤	40.4	15.8	39.0	2008	
		⑥	55.0	21.1	38.3	2833	
第2日目	18.5	①	66.1	30.6	46.4	1626	30.3
		②					
		③	85.6	32.7	38.3	1878	
		④	66.7	32.4	48.5	1304	
		⑤	45.3	12.7	28.1	2196	
		⑥	69.0	33.5	48.6	1670	
	3.0	①	28.5	14.1	49.6	2763	41.6
		②					
		③	36.6	18.6	50.8	3362	
		④	31.1	16.8	54.1	2102	
		⑤	33.2	11.2	33.7	3133	
		⑥	57.3	26.2	45.7	1167	
	16.0	①	32.4	13.0	40.1	1774	42.1
		②					
		③	73.0	43.1	59.1	2919	
		④	58.0	26.0	44.8	2633	
		⑤	48.1	18.5	38.4	1759	
		⑥	33.5	19.3	57.6	656	
第3日目	20.0	①	49.7	24.4	49.0	390	25.9
		②	67.1	24.3	36.3	855	
		③	100.9	28.9	28.7	1729	
		④					
		⑤	83.9	19.7	23.5	1352	
		⑥	75.9	32.6	43.0	1241	
	18.0	①	49.4	31.7	64.1	854	27.6
		②	71.9	34.6	48.1	1316	
		③	97.4	41.8	43.0	1875	
		④					
		⑤	99.4	25.4	25.6	1525	
		⑥	76.6	22.3	29.2	1573	
	5.0	①	47.0	13.8	29.3	1829	42.8
		②	59.2	25.8	43.6	2807	
		③	54.8	21.8	39.9	2132	
		④					
		⑤	67.8	18.3	27.0	2170	
		⑥	68.2	11.6	17.0	2382	

定したデータの統計値である。3日間の締固め実験において、無線ICタグの取り付け位置は異なっているが、本研究の目的が、かぶり部のコンクリートに伝播する加速度の減衰であるため、格子状鉄筋の内側にある無線ICタグと、外側にある無線ICタグをそれぞれ同一グループとして扱い両者を比較した。

さらに、グラフには、池澤らのシングルボードコンピュータを使って、加速度センサを有線で接続した場合の締固め実験²⁾で計測した加速度の時系列データから求めた平均値と変動係数を、白抜きのデータとしてプロットした。

今回の実験においても、格子状鉄筋外側においても内側と程度の加速度が計測されており、鉄筋の有無は加速

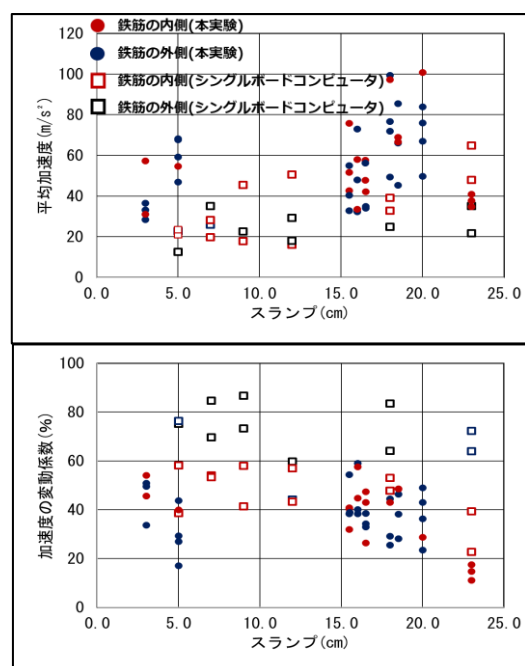


図-8 スランプごとの平均加速度と変動係数

度の伝播に影響を与えていないことが言える。これは、池澤の知見と一致する。

スランプの大きさに着目すると、2日目のスランプ3cmにおいて加速度が小さかった。池澤らの実験では、スランプの大きさに関係なく、加速度は一定であるという知見であった。また、加速度の大きさが、スランプの大きさにあまり依存しないという実験結果は、梁らの論文³⁾における「鉄筋を埋設した模擬試験体における加速度分布の測定」で求められたスランプ15cm、12cmおよび8cmの加速度の分布形状がほぼ同じという計測の結果も公表されている。

今回の実験データは大きなばらつきがあるため、今回の実験結果のみで断言することはできないと思われるが、スランプが小さくなるに従って加速度が小さくなる傾向が認められた。

シングルボードコンピュータと加速度センサを有線で接続した池澤らの計測方法とは異なり、無線 IC タグの場合は有線ではないため、無線 IC タグに内蔵されている加速度センサは、コンクリートの流動方向に従って大きく移動することはない。ナイロン袋で格子状鉄筋に括り付けられているため、その位置でのフレッシュコンクリート中の伝播された加速度を計測している。この違いが加速度の値に影響を及ぼしていると想像される。

スランプが小さくなると加速度が減衰する要因としては、スランプが小さいほど流動性が低いいため、無線 IC タグが拘束され振動が伝播しなかったためではないかと思われる。

本実験では、配合を一定としてスランプロスさせて締固め実験を行った場合の結果であり、さらに実験データを増やす必要がある。

一方、スランプと変動係数の関係では、池澤らのシングルボードコンピュータを使って、加速度センサを有線で接続した場合の締固め実験²⁾で計測した加速度の時系列データから求めた変動係数よりも、今回の無線 IC タグによる計測データの方が、変動係数が小さかった。この傾向はスランプの大きさに依存はしていなかった。

これは、センサが流動方向に移動しない方が、加速度の乱れが小さいということであり、無線 IC タグによる伝播加速度の計測の方が、ばらつきが小さく安定した計測が行いやすいと思われる。

6. 本計測システムの適用限界

本研究では、無線 IC タグの計測が不調な場合があった。コンクリートの打込表面近傍に移動したために、加速度の大きさが著しく低下した場合とは異なり、通信が計測途中で遮断されてしまう状況があった。

本研究の前実験として、フレッシュコンクリート中に

無線 IC タグによる通信が可能かどうかを検討した。水中や水セメント比が非常に大きい場合は、通信が遮断されることが明らかになった。また、厚みが非常に厚い鋼製型枠（厚さが10mm以上）の場合も、通信が遮断された。さらに、無線 IC タグの上方にコンクリートが20cm程度以上打ち込まれた場合も通信が遮断される場合があった。

つまり、この無線 IC タグによる伝播加速度の計測システムが使用できる条件がある。したがって、今回の計測が不調な結果は、その適用限界を超えたためではないかと思われる。今後は、本計測システムの適用範囲を明確にする必要がある。

また、内部に充填される材料の密度が影響しているという可能性も考えられるため、そのことについても検討する必要がある。

7. 結論

本実験の範囲内で明らかになったこと記す。

- 1) 静電容量型加速度センサ内蔵無線 IC タグを用いた計測システムは、適用限界を超え、無線通信が遮断されない限り、従来の有線計測でなく、完全な無線化計測で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が可能である。
- 2) 締固め時に流動するフレッシュコンクリート内部に伝播する加速度は、かぶりコンクリートに存在する格子状鉄筋の影響をほとんど受けない。つまり、鉄筋による締固めエネルギーの減衰は小さい。
- 3) 静電容量型加速度センサ内蔵無線 IC タグを用いた計測システムの適用範囲が存在し、その範囲外では、無線通信が遮断される。

参考文献

- 1) 藤原京介, 橋本親典, 山地功二, 渡邊健: 加振ボックス充填装置内を流動するフレッシュコンクリートに棒パイプレータから伝搬される加速度の計測システムの開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.766-771, 2022.7
- 2) 池澤壮太, 橋本親典, 石丸啓輔, 渡邊健: Wi-Fi と Raspberry Pi を用いた振動締固め途中のフレッシュコンクリートに伝搬する加速度の計測, 第76回セメント技術大会講演概要集 2022Web 版, Vol.76, pp.224-225, 2022.5
- 3) 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), Vol.75, No.2, pp.142-156, 2019.2