

外部振動機の最適配置を目的とした  
プレキャストコンクリート型枠内に充填する  
コンクリートの伝搬加速度の定量化に関する研究

2024年3月

山 地 功 二

## 目 次

	頁
<b>第 1 章 序論</b> . . . . .	1
1.1 研究の背景と目的 . . . . .	1
1.2 本論文の構成 . . . . .	2
1.2.1 本論文の構成概要 . . . . .	2
1.2.2 本論文の各章の概要 . . . . .	3
第 1 章の参考文献 . . . . .	6
<b>第 2 章 プレキャストコンクリート製品の現状</b> . . . . .	7
2.1 プレキャストコンクリート業界の現状 . . . . .	7
2.2 プレキャストコンクリート製品の製造 . . . . .	8
2.3 プレキャストコンクリート型枠の仕様 . . . . .	10
第 2 章の参考文献 . . . . .	12
<b>第 3 章 既往の研究</b> . . . . .	13
3.1 フレッシュコンクリートの締固め性に関する既往の研究 . . . . .	13
3.2 各種センサを用いたフレッシュコンクリートの締固めに関する 既往の研究 . . . . .	14
3.3 フレッシュコンクリートの締固めに関する最新適用技術および システム等について . . . . .	14
第 3 章の参考文献 . . . . .	17
<b>第 4 章 プレキャストコンクリートを想定したフレッシュコンクリートに     伝搬される加速度の計測システムの開発</b> . . . . .	19
4.1 はじめに . . . . .	19
4.2 無線加速度計の開発 . . . . .	19
4.2.1 シングルボードコンピューター . . . . .	20

4.2.2	無線加速度計	20
4.2.3	シングルボードコンピュータの設定	21
4.2.4	加速度センサ	21
4.3	実験詳細および方法	22
4.3.1	使用した材料およびコンクリートの配合	22
4.3.2	加振ボックス充填装置および鋼製フレーム	23
4.3.3	内部振動機および可変変圧器	24
4.3.4	実験方法	24
4.3.5	計測データの整理	25
4.4	実験結果および考察	25
4.4.1	各シリーズにおけるフレッシュコンクリートの性状	25
4.4.2	実験：シリーズ1	25
4.4.3	実験：シリーズ2	28
4.5	本章のまとめ	31
	第4章の参考文献	33

## 第5章 プレキャストコンクリートを想定したコンクリートの模擬型枠内

	に充填される伝搬加速度の計測	34
5.1	はじめに	34
5.2	実験詳細および方法	34
5.2.1	使用した材料およびコンクリートの配合 (4.4.1 同様)	34
5.2.2	フレッシュコンクリートの加速度計測装置	35
5.2.3	模擬型枠による締固め試験概要	36
5.3	実験結果および考察	38
5.3.1	実験に使用したコンクリートのフレッシュ性状	38
5.3.2	スランプ 18.0cm における合成加速度の計測結果	39
5.3.3	スランプ 12.0cm における合成加速度の計測結果	40
5.3.4	スランプ 9.0cm における合成加速度の計測結果	40
5.3.5	スランプと計測位置における平均合成加速度との関係	41
5.4	本章のまとめ	43

第 5 章の参考文献	45
<b>第 6 章 プレキャストコンクリート型枠内を充填するフレッシュ</b>	
<b>コンクリートの伝搬加速度の計測および定量化</b>	46
6.1 はじめに	46
6.2 静電容量式加速度センサ付き無線 IC タグを用いた計測装置	46
6.2.1 使用した無線 IC タグ	46
6.2.2 無線 IC タグの設定方法	47
6.2.3 無線 IC タグの使用に関する事前処理	48
6.3 実験詳細および方法	49
6.3.1 使用した材料およびコンクリートの配合	49
6.3.2 実験に使用したプレキャストコンクリート	50
6.3.3 無線 IC タグの取付け箇所および外部振動機について	51
6.3.4 無線 IC タグの計測方法	54
6.3.5 計測データの整理	54
6.4 実験結果および考察	55
6.4.1 各配合シリーズにおけるフレッシュコンクリートの性状	55
6.4.2 配合：シリーズ①【製品：U型水路】	55
6.4.3 配合：シリーズ②【製品：L型擁壁】	59
6.4.4 配合：シリーズ②【製品：ボックスカルバート】	62
6.4.5 フレッシュコンクリートの性状および無線 IC タグ位置と 合成加速度との関係	64
6.5 本章のまとめ	67
第 6 章の参考文献	69
<b>第 7 章 無線 IC タグのコンクリート媒質への適用範囲および</b>	
<b>コンクリートの伝搬加速度測定に関する今後の展望</b>	70
7.1 はじめに	70
7.2 無線 IC タグ	71
7.2.1 無線 IC タグの概要詳細	71

7.2.1	無線 IC タグの概要詳細	71
7.2.2	無線 IC タグの測定方法	71
7.2.3	無線 IC タグの使用に関する事前処理	72
7.3	実験詳細および方法	73
7.3.1	使用した材料および媒質配合	73
7.3.2	実験器具：シリーズ①	74
7.3.3	実験器具：シリーズ②	74
7.3.4	無線 IC タグの測定方法：シリーズ①	76
7.3.5	無線 IC タグの測定方法：シリーズ②	76
7.4	実験結果および考察	78
7.4.1	媒体の差異による通信適用範囲	78
7.4.2	媒質：水による通信適用範囲	79
7.4.3	媒質：グラウトによる通信適用範囲	80
7.4.4	媒質：モルタルによる通信適用範囲	82
7.4.5	媒質：コンクリートによる通信適用範囲	83
7.4.6	各媒質における無線 IC タグの通信適用範囲	85
7.5	本章のまとめおよびコンクリートの伝搬加速度測定に関する 今後の展望	86
	第7章の参考文献	89
<b>第8章</b>	<b>結論</b>	<b>90</b>
8.1	本研究の結論	90
8.2	今後の課題および展望	93
	謝 辞	94

## 第1章 序 論

### 1.1 研究の背景と目的

現在、我が国の建設業界においては、就労者数が平成9年の685万人をピークに平成22年に498万人、令和3年に482万人と約25%以上も減少している。就業者年齢層は、55歳以上が35.5%、29歳以下が12.0%と就業者の3割以上が55歳以上の高齢化が進行し、次世代への技術承継が課題となっている<sup>1)</sup>。また、建設業界における作業環境は、労働者不足や厳しい施工納期、難易度の高い工事および工法、生産性向上が求められている工種（鉄筋工、型枠工、コンクリートの打設および締固めを含むコンクリート工、型枠解体）など、年々状況は厳しさを増している<sup>2)</sup>。そのため、近年、建設現場におけるIoT技術の導入およびDX活用に取り組む事例が増加し、生産性の向上、効率化および省力化等が推し進められている。それに伴い、建設現場にて工場生産されたプレキャストコンクリートを使用する建設現場が徐々に多くなっており、種々の作業の省力化等が喫緊の課題となっている。

一方、コンクリート構造物を製造・施工する上で重要な要素の一つにフレッシュコンクリートの充填および締固めという工程がある。その締固め作業においては、一般的にバイブレーターを用いた内部振動機や型枠に取付ける外部振動機を用いるが、土木学会標準示方書：施工編の一部に数値基準はあるものの、そのほとんどが定量的ではなく、定性的な締固め作業標準のものとなっており<sup>3)</sup>、現場作業の締固めは、定量的基準および評価に基づいたものになっておらず、十分な品質管理が行われていないものと考えられているのが現状である。既往の研究においても有線加速度計や型枠に取り付けたセンサによる加速度評価<sup>4),5)</sup>が多く、締固めによるフレッシュコンクリートの加速度を直接計測しているものは皆無である。

また、プレキャストコンクリートの打ち込みに関しても、同様である。つまり、外部振動機によるフレッシュコンクリートの締固めによって、充填中のコンクリートに伝搬される加速度を直接計測して、合理的な型枠の設計をするような研究は皆無である。

これらの背景より、本研究では、まず、最初に、締固めによるフレッシュコ

ンクリートの伝搬加速度の定量化を目的に、シングルボードコンピュータと静電容量式の加速度センサを用い、フレッシュコンクリートに伝播される加速度を通信規格 IEEE802.15.4 の環境下で同時多点を無線通信で直接計測するシステムの開発を行い、模擬型枠において、内部振動機からフレッシュコンクリートに伝搬する加速度の計測を実施した。その後、シングルボードコンピュータと加速度センサは有線であるため、完全な無線化ではないという欠点があったため、前述の計測システムから改善を加え、3軸加速度センサ、磁気センサを搭載したワイヤレスの静電容量式加速度センサ付き無線 IC タグ（以下、無線 IC タグと、略記）をノート PC に接続した受信機にてデータ受信するという計測システムを新たに試作し、試験実施した。これによって、遠隔操作によるフレッシュコンクリートの伝播加速度を完全無線化で計測を行うことが可能となり、同時多点計測を可能にした無線 IC タグを使用した計測手法にて、プレキャストコンクリート工場にて製造される製品用コンクリートを対象に、鋼製型枠内へ打込みされる有スランプおよび締固めを要する高流動のフレッシュコンクリートの締固め過程における伝播加速度を計測した。

外部振動機によって締固めエネルギーが与えられるプレキャストコンクリート製品型枠の形状が伝播加速度に与える影響について検討を行ったものである。これらの定量的数値は、これまで経験的な配置であった外部振動機の最適配置を行うことができる可能性を示すことができた。

## 1.2 本論文の構成

### 1.2.1 本論文の構成概要

本論文は、計8章で構成されており、以下に概要を示す。

プレキャストコンクリート型枠に設置される外部振動機の最適配置を目的としたフレッシュコンクリートコンクリートの伝搬加速度の定量化に関する実験的研究を行った。そこで、**第2章**では、プレキャストコンクリート製品の技術の現状、**第3章**は既往の研究について論じた。**第4章**では、最新の IoT 技術を導入し、シングルボードコンピュータと静電容量式の加速度センサを用い、プレキャストコンクリートを想定したフレッシュコンクリートに伝播される加速度を通信規格 IEEE802.15.4 の環境下で同時多点を無線通信で直接計測するシステ

ムの開発について検証結果を報告する。次にそのシステムを用いて**第5章**では、プレキャストコンクリートを想定した模擬型枠に充填されるフレッシュコンクリートの伝搬加速度の計測を実験的に検証し、その有効性について確認した。その後、**第6章**では、計測システムの改善を加え、完全無線式の計測システムを構築した。それらの計測装置である3軸加速度センサおよび磁気センサを搭載したワイヤレスの静電容量式加速度センサ付き無線ICタグを用いて、各種プレキャストコンクリート型枠内を充填するコンクリートの伝搬加速度を測定し、その定量化について検証を行い、プレキャストコンクリート型枠に取付ける外部振動機の最適配置について考察した。**第7章**では、**第4章**から**第6章**までの研究成果を踏まえて、無線ICタグのコンクリート媒質への適用範囲について検証を行い、コンクリートの伝搬加速度測定に関する展望について、考察した。

## 1.2.2 本論文の各章の概要

本論文の各章の概要を以下に示す。

### 第1章 序論

**第1章**では、本論文の研究の背景および目的を概説し、論文構成について述べた。

### 第2章 プレキャストコンクリート製品の現状

**第2章**では、プレキャストコンクリート業界の現況と課題について整理を行った。また、実際製造されている代表的なプレキャストコンクリート製品の製造方法の詳細、かつ使用されているプレキャストコンクリート用型枠の仕様について取り纏めを行った。

### 第3章 既往の研究

**第3章**では、型枠内に充填されるフレッシュコンクリートの締固め性に関する既往の研究、各種センサを用いたフレッシュコンクリートの締固めに関する既往の研究についての文献を収集・調査した。また、フレッシュコンクリート

の締固めに関する最新適用技術およびシステム等について情報調査し，その概要について要約した。

#### **第4章 プレキャストコンクリートを想定したフレッシュコンクリートに伝搬される加速度の計測システムの開発**

第4章では，最新のIoT技術を導入し，シングルボードコンピューターと静電容量式の加速度センサを用い，プレキャストコンクリートを想定したフレッシュコンクリートに伝播される加速度を通信規格 IEEE802.15.4 の環境下で同時多点を無線通信で直接計測するシステムの開発を行い，その適用性や優位性についての検証を行った。

#### **第5章 プレキャストコンクリートを想定したコンクリートの模擬型枠内に充填される伝搬加速度の計測**

第5章では，第4章で開発された通信規格 IEEE802.15.4 の環境下で，シングルボードコンピューターと静電容量式加速度センサを組み合わせた計測システムを用い，プレキャストコンクリート工場で製造される配合のコンクリートを模擬型枠内に充填し，フレッシュコンクリートの伝搬加速度の計測を実施した。その実験結果を検証し，その有効性について確認したものである。

#### **第6章 プレキャストコンクリート型枠内を充填するフレッシュコンクリートの伝搬加速度の計測および定量化**

第6章では，第4章および第5章の計測システムにおいて，一部有線を用いていることより，それらの改善を加え，完全無線化した計測システムを構築した。計測装置である3軸加速度センサおよび磁気センサを搭載したワイヤレスの静電容量式加速度センサ付き無線ICタグを用いて，U型水路，L型擁壁およびボックスカルバート用のコンクリートをプレキャストコンクリート型枠内に充填させ，フレッシュコンクリートの伝搬加速度を測定した。その伝搬加速度の定量化について検証を行い，プレキャストコンクリート型枠に取付ける外部振動機の最適配置に基礎資料としての有用性について検討を行った。

## 第7章 無線 IC タグのコンクリート媒質への適用範囲および コンクリートの伝搬加速度測定に関する今後の展望

第7章では、第6章で用いた静電容量式加速度センサ付き無線 IC タグの受信不通事象の原因およびその発生状況について検討し、コンクリート媒体への受信適用範囲について、各種実験を行い、その概略評価を行った。また、フレッシュコンクリートの伝搬加速度測定に関する展望としての考察を論じた。

## 第8章 結論

第8章では、本研究で得られた成果を総括し、結論として取り纏めるとともに、今後の更なる課題および展望について論じた。

## 第 1 章の参考文献

- 1) 国土交通省：最近の建設業を巡る状況について，持続可能な建設業に向けた環境整備検討委員会，第 1 回検討会，参考資料 1，2022
- 2) 国土交通省：コンクリート工における建設現場の生産性に関する現状，コンクリート生産性向上検討協議会，第 1 回，資料 1，2016
- 3) 公益社団法人土木学会：コンクリート標準示方書【施工編】，2017
- 4) 梁俊，国府勝郎，宇治公隆，上野敦：フレッシュコンクリートの締固め性試験に関する研究，土木学会論文集 E，Vol.62，No.2，pp.416-427，2006.6
- 5) 山内匡，野口貴文，山本秀之，友寄篤：加速度センサによるコンクリート振動締固め状況の把握，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.1337-1442，2019

## 第2章 プレキャストコンクリート製品の現状

### 2.1 プレキャストコンクリート業界の現状

建設業界は、他の業界と比較して、「高齢化」「若手労働者不足」の傾向があり、今後もその傾向は続くものと推察される。それに伴い、国土交通省は、2015年に「i-Construction 委員会」を立ち上げ、生産性の向上と魅力ある建設業への変革を強く推進している。その活動の主体的事項の一つが「コンクリート工の規格の標準化等」の中でプレキャストコンクリート製品の有効活用が注目されている。現場打ちコンクリートと比較して、プレキャストコンクリート製品を利用するメリットとしては、主に以下が挙げられる。

- (1) 工期短縮
- (2) 安定したコンクリートの品質
- (3) 現場作業の省力化および省人化
- (4) 現場管理の軽減
- (5) 部材の薄肉化および軽量化 等々

しかしながら、我が国におけるプレキャストコンクリート製品導入率は、15%以下と低く推移しており、欧米を中心とした諸外国の導入率(25%以上)より、大幅に低いものとなっている<sup>1),2)</sup>。

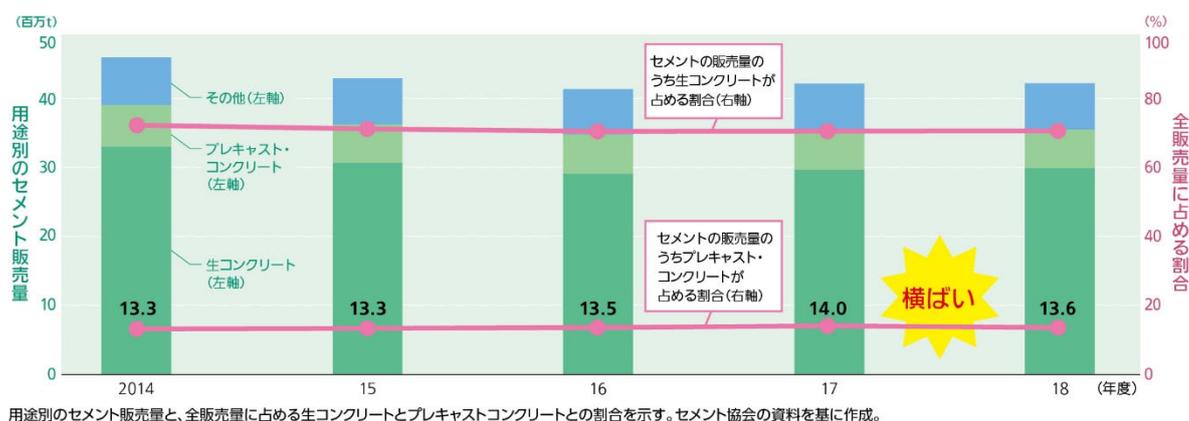


図 2.1 各年度の用途別セメント使用量<sup>3)</sup>

一方、プレキャストコンクリート業界は、前述のプレキャストコンクリート製品の有効活用を期して、種々事業展開しているが、上場 12 社による 2023 年

度3月期連結決算を振り返ると全体的に需要が低調であったこと、資材価格の高騰などから、売上および利益とも堅調であったとは言い難い現状であった<sup>4)</sup>。しかしながら、以前も将来も現場打ちコンクリートで対応が困難な部位や省力化および省人化となる製品製造を実践していくものと思われる。また、昨今のサステナビリティ経営によるESGおよびSDGsのもと、カーボンニュートラルや脱炭素化社会の形成に寄与する製品および材料開発も同時に行っている。

## 2.2 プレキャストコンクリート製品の製造

プレキャストコンクリート製品の製造は、現場打ちコンクリートと一部異なる製造を行っている。基本的事項は、コンクリートを練混ぜし、型枠内に打設をし、締固め、仕上げ、養生、脱型を行い、所定の品質を確保するまでの材齢を確保し、出荷するものである。表2.1にプレキャストコンクリートと現場打ちコンクリートとの主な項目を示す。

表 2.1 各種コンクリートの製造項目

項目	プレキャストコンクリート	現場打ちコンクリート
コンクリート材料	JIS等の規定材料	JIS等の規定材料
	各種混和材可	各種混和材一部可
型枠材質	概ね鋼製	木製，鋼製
鉄筋	JIS等の規定材料	JIS等の規定材料
練混ぜ	自社プラント	レディミクストコンクリート工場
運搬	概ねなし	アジテーター車
締固め	概ね外部振動機	概ね内部振動機
	遠心成型締固め	
養生	促進養生	現場養生
脱型	概ね翌日	一定期間経過後
設計基準強度材齢	概ね14日	概ね28日
製造サイズ	運搬可能なサイズ	大型構造物まで可

プレキャストコンクリートと現場打コンクリートとの製造差異としては、型枠がほぼ全てが鋼製の強固な型枠である。理由は、その鋼製型枠を何十回、何百回と流用し、同一の製品を製造することを目的としているからである。レディミクストコンクリートには、プラントから施工現場までの運搬が発生するが、

プレキャストコンクリートは自社プラントで練混ぜを行い、コンクリート打設を行うので、運搬はないということになる。コンクリートの締固めにおいては、外部振動機（高周波）を用いて振動締固めを行うのも特徴である。一方、養生においては促進養生（常温常圧の蒸気養生）を実施し、翌日脱型を基本とすること多いのも特徴の一つである。図 2.1 にプレキャストコンクリートの主な製造工程を示す。

なお、製造製品は藻場造成および海域環境改善を目的とした魚礁ブロックである。



図 2.1 プレキャストコンクリートの製造工程

製造製品は、ボックスカルバート等の暗渠製品，L型擁壁等の擁壁類，境界ブロックや側溝等の道路用製品，水路製品，河川護岸製品，電柱等のパイル製品，橋梁上部工の梁，建築構造物の柱・梁など多岐にわたっている。

### 2.3 プレキャストコンクリート型枠の仕様

2.2 で述べた通り，プレキャストコンクリート型枠は概ね鋼製型枠として，使用している。使用頻度を満足する耐久性や寸法精度，脱型作業の効率化等の観点から，多くの企業で鋼製型枠が採用されている。図 2.2 に主なプレキャストコンクリート型枠を示す。



図 2.2 主なプレキャストコンクリート型枠  
(上段：ボックスカルバート×2，水路製品)  
(下段：L型擁壁，魚礁ブロック，スラブ)

強固な鋼製リブ構造となっており，製品質量や流用回数に応じて，鋼板の厚みや構造を設計し，構築されている。また，外部振動機を取付け，強制振動させ，コンクリートの締固めを行うことが多く，その取付け箇所等は概ね経験則に基づいて設置されている（図 2.3）。



図 2.3 外部振動機の取付け状況

## 第 2 章の参考文献

- 1) 伊達重之：建設工事へのプレキャスト製品活用の現状，建設機械施工，Vol.71，No.9，pp.25-36，2019.9
- 2) 那須將弘：プレキャストコンクリート製品の活用の現状と普及のための課題，コンクリート工学，Vol.55，No.9，pp.800-803，2017.9
- 3) 一般財団法人建設業振興基金：建設業しんこう，No.511，pp.11，2019.9
- 4) 株式会社公共事業通信社：週刊ブロック通信，第 3239 号，2023.6

### 第3章 既往の研究

型枠内に充填されるフレッシュコンクリートの締固めについて、種々の研究がなされ、その試験方法および評価については多岐にわたっている。本章では、フレッシュコンクリートの締固め性や伝搬加速度の試験および測定方法等に関する技術の現状をとりまとめ、本研究の最終目的としている外部振動機の最適配置を目的としたプレキャストコンクリート型枠内に充填するコンクリートの伝搬加速度の測定方法や定量化するための参考とした。

#### 3.1 フレッシュコンクリートの締固め性に関する既往の研究

フレッシュコンクリートを型枠内に充填させ、内部および外部振動機により、コンクリートを締固める。十分な締固めがなされていない場合、硬化コンクリートの品質に多大な影響を及ぼすこととなる。このため、コンクリートの硬化前に締固め性を評価および判断することはとても重要である。

梁ら<sup>1)</sup>はフレッシュコンクリートの締固め性について、振動台試験装置等を用いて、打設直後のコンクリートをスランプ試験で行った状態としてモデル化し、振動による変形性状を測定することにより、定量的に評価することが可能であることを明らかにしている。また、丸屋ら<sup>2),3)</sup>は、締固め完了エネルギーを評価できると定義した一定振幅に振動する試験装置を用い、内部振動機の挿入間隔と振動時間を定量的に評価する方法を検討し、実構造物でその評価について問題がないことを確認している。

永山<sup>4)</sup>および森山ら<sup>5)</sup>は、型枠内にコンクリートを充填させ、コンクリートの充填速度と内部振動機挿入位置および応答加速度との関係から、かぶり部のフレッシュコンクリートの締固めに適切な内部振動機の挿入位置および振動時間を推定できると報告している。

神代<sup>6)</sup>らは、スランプの異なるコンクリートを対象に振動エネルギーと硬化性状の関係を把握し、型枠内のコンクリート中の内部振動機が発生する振動エネルギーの可視化を行い、打設範囲をブロック分割し、ブロック内に累積する振動エネルギーを表示することで締固めの可視化シミュレーションが可能となると報告している。

### 3.2 各種センサを用いたフレッシュコンクリートの締固めに関する既往の研究

フレッシュコンクリートの締固めによる伝搬加速度を測定することは、コンクリートの締固めを判断および評価する上で重要である。また加速度センサにおいて、有線か無線かも現場レベルでは重要であるとともにその測定手法の確立も急務である。

金子ら<sup>7)</sup>は、コンクリートの充填確認について、振動を利用したセンサに接触する物質の識別を可能としたコンクリートの充填検知手法を実現し、用いる有線の検知センサにて、振動加速度を計測した。その結果、コンクリートの打設・締固め時に密実な充填を確認できたことを明らかにしている。

古屋<sup>8)</sup>らは、ダム用コンクリートの締固め判定において、内部振動機に有線加速度計を設置固定し、締固めが進行すると内部振動機の振動数に近似する。コンクリートの波動波形の振幅の二乗和が一定値に近づくことにより、コンクリートの締固め状況を定量的に判断できるようになると報告している。

山内<sup>9)</sup>らは、コンクリート型枠に直接取付けた無線スマートセンサによって、内部振動機によるコンクリートの締固め時の振動加速度を加速度センサで捉え、室内試験および実構造物試験にて測定を実施した。その結果、スマートセンサで捉えた加速度の値には妥当性があり、コンクリートの強度や表層品質との関係から締固め度合いを評価し、締固め完了エネルギーを設定することによって、スマートセンサ近傍のコンクリートの締固め状況を把握および管理できる可能性を見出すことができたと報告している。

### 3.3 フレッシュコンクリートの締固めに関する最新適用技術およびシステム等について

近年、ICT技術の活用により、建設工事における生産性向上を目的とした「i-Construction」が推進されている。このような背景の中、フレッシュコンクリートの締固めによる伝搬加速度を計測するセンサやシステムの構築は、日々技術開発がなされている。以下に紹介する。

齋藤<sup>10)</sup>らは、センシングネットワークを用いた建築物・橋梁等の振動データを大規模に情報収集できるセンサとして無線 IC タグ（図 3.1, RFID : Radio

Frequency Identification) に着目した。無線 IC タグは、小型化・省電力化および高性能であり、低価格な高機能センサである。収集したデータを解析し、その結果として構造物の状況を把握して安全性を検証する一つの指標を作ることができ、橋梁点検等の効率の向上の可能性を探ることができると報告している。



図 3.1 無線 IC タグの例 <sup>10)</sup>

コンクリート打設時の内部振動機による締固め状況を AI で分析し、可視化する「コンクリート締固め管理システム」を開発し、経験の少ない作業員でも締固め完了のタイミングを適切に判断でき、コンクリートの品質を安定的に確保できるとの情報開示 <sup>11)</sup>がある。

「コンクリート充填検知システム」を開発し、型枠面等に固定したケーブル付きの充填検知センサで圧力や温度測定を行い、フレッシュコンクリートの充填状況をリアルタイムでグラフおよび数値表示させ、締固め完了を検知するシステム <sup>12)</sup>である。

「コンクリート充填ソリューション」を開発し、AI カメラによる画像解析にて、フレッシュコンクリートの充填状況が見える化し、同時に情報の共有化を実現させた。作業箇所や締固め完了をリアルタイムで判断でき、コンクリート工における品質の向上と省力化に活用できるとの報告 <sup>13)</sup>がある。

本研究にて、最終的に提案するフレッシュコンクリートの伝搬加速度を計測システムは、ワイヤレスの静電容量式加速度センサ付き無線 IC タグとシングルボードコンピューターを使用した計測手法である。従来の有線センサと比較して非常に安価で、かつそれらの無線 IC タグ多数使用することにより、同時多点計測を行うことが可能であり、特別な記録装置等は不要で市販の汎用器材で計測システムを構築することができる。また、フレッシュコンクリートの伝搬

加速度の測定において，締固められるコンクリート内部を直接測定した研究報告例は希少，かつプレキャストコンクリートに関する実証例も皆無である。

### 第3章の参考文献

- 1) 梁俊, 国府勝郎, 宇治公隆, 上野敦: フレッシュコンクリートの締固め性試験に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.2, pp.416-427, 2006.6
- 2) 丸屋剛, 梁俊, 坂本敦, 宇治公隆: 締固めエネルギーの観点から見たフレッシュコンクリートの品質および施工性能の評価, コンクリート工学, Vol.51, No.4, pp.319-326, 2013.4
- 3) 梁俊, 丸屋剛, 坂本敦, 松元淳一, 下村泰造, 滝沢正徳: 締固め完了エネルギーに基づくコンクリートの締固め完了範囲の評価方法に関する研究, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.4, pp.438-449, 2013
- 4) 永山剛, 宇治公隆, 上野敦, 大野健太郎: 振動締固め時の応答加速度に着目したフレッシュコンクリートの間隙通過性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1393-1398, 2017
- 5) 森山崇大, 宇治公隆, 上野敦, 大野健太郎: 振動締固め時の加速度伝搬がかぶりコンクリートの締固め性および品質に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1071-1076, 2018
- 6) 神代泰道, 金子智弥: コンクリートの締固め状況の可視化に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1201-1206, 2015
- 7) 金子稔, 安田正雪, 末岡英二, 坂井孝: 締固め検知機能を付加したコンクリートの充填検知システムの開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.2077-2082, 2009
- 8) 古屋弘, 上高克弘, 久保貴士: ダム用コンクリート締固め判定手法の開発, 大林組技術研究所報, No.78, 2014
- 9) 山内匡, 野口貴文, 山本秀之, 友寄篤: 加速度センサによるコンクリート振動締固め状況の把握, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1337-1442, 2019
- 10) 齋藤修, 安原一哉: 社会基盤施設の振動解析のためのセンシングネットワークの適用の可能性, 15回地理情報システム学会研究発表会, 2006
- 11) 清水建設株式会社, 他: コンクリート締固め管理システムを開発～AIを活用し締固め状況を可視化～, ニュースリリース, 2021.6

12) 日本工業検査株式会社：コンクリート充填検知システム，2018

13) エコモット株式会社，村本建設株式会社：コンクリート充填検知システム，生産性向上 AI カメラ

## 第4章 プレキャストコンクリートを想定したフレッシュ コンクリートに伝搬される加速度の計測システムの開発

### 4.1 はじめに

近年、コンクリートの施工を取り巻く環境は年々厳しくなっている。そのため、IT技術等を駆使し、効率的および省力的な施工を実施していく必要性が増している。中でも、コンクリートの締固めに着目した場合、コンクリート内部に発生する加速度を定量的に評価することが重要であるが、高価な有線加速度計を用いたり、フレッシュコンクリートを直接計測した事例は皆無である。そこで、本研究では、プレキャストコンクリートを想定し、小型のシングルボードコンピューター、通信規格 IEEE802.15.4 を用いた安価な無線加速度計測システムを開発した。そのシステムを使って、型枠内へのフレッシュコンクリートが流動する過程の伝搬加速度の計測を実施し、その評価を行った。

### 4.2 無線加速度計の開発

フレッシュコンクリートの締固め時の伝搬加速度の計測は、各種型枠の外部からのもの（図 4.1）が大勢を占めている<sup>1)</sup>こと、一方、内部のフレッシュコンクリートを直接計測する場合には、高価な有線加速度計（図 4.2）の使用や制御および記録装置が必要となってくる。また、有線加速度計は加速度センサと制御部分も有線で接続されており、大規模構造物や複雑な断面の構造物への設置および適用が困難であることが容易に推測される。



図 4.1 有線加速度計（外部接触型）<sup>2)</sup> 図 4.2 有線加速度計（埋設型）<sup>3)</sup>

そこで、本実験では前述の事項からの改良および改善、作業性および経済性

を考慮し、小型のシングルボードコンピューターと静電容量式の加速度センサ、通信規格 IEEE802.15.4 を用いた無線加速度計測システムの開発に取り組んだ。

#### 4.2.1 シングルボードコンピューター

小型のシングルボードコンピューターは、センサが接続できる GPIO (汎用入出力ピン) を装備しており、無線 LAN ルータを介した遠隔操作が可能な器材である (図 4.3)。



図 4.3 小型シングルボードコンピューター

#### 4.2.2 無線加速度計

図 4.4 に小型シングルボードコンピューター、モバイルバッテリー、3 軸の加速度センサを組み合わせた無線加速度計を示す。作製した無線加速度計は、ノート PC から通信するためのプロトコルである SSH 接続を用いて、コマンドやデータを送受信し計測を行った。

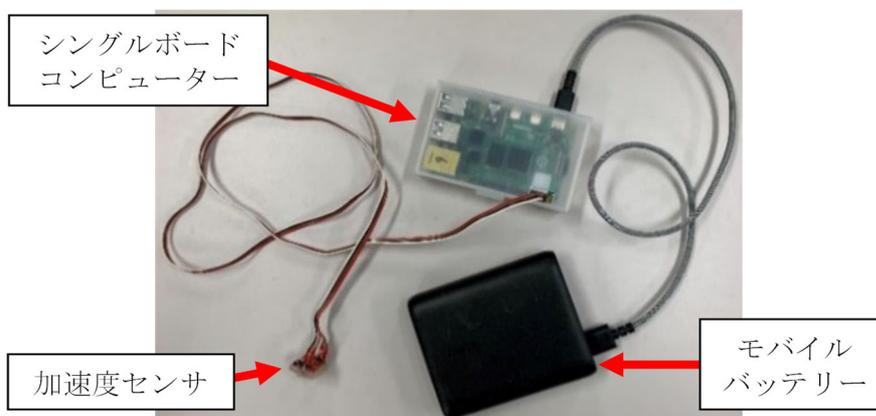


図 4.4 無線加速度計

### 4.2.3 シングルボードコンピューターの設定

使用したシングルボードコンピューターは、「Raspberry Pi 4 model B」を用いることとし (<https://www.raspberrypi.com/software/>), URL より「Raspberry Pi Imager」をダウンロードし, これを用いて OS の書き込みを行った。使用した OS は, 「Raspberry Pi OS Lite (32bit)」で, microSD カードへ書き込みを行う。その後, Raspberry Pi へ microSD カードを挿入し, 通信規格 IEEE802.15.4 への接続が可能な環境で Raspberry Pi を起動する。OS 「Windows10」の Command プロンプトにて, 「>>> ssh pi@raspberrypi.local -p 22」コマンドを入力し, SSH 接続を行う。「pi@raspberrypi:~」と表示されると, SSH 接続による遠隔操作が可能になる。その後, 以下に示す設定を行った。

#### (1) OS のアップデート

シングルボードコンピューター「Raspberry Pi OS」のアップデートを行う。

#### (2) ホスト名の変更

複数台の Raspberry Pi を同時に利用する場合に, 判別が可能となるよう任意のホスト名に変更する。

#### (3) 通信インターフェイス「i2c」の有効化

センサを接続するため, i2c を有効にする。

#### (4) FTP サーバー「vsftpd」のインストール

計測データのファイルを Raspberry Pi から転送するため, vsftpd をインストールする。

#### (5) センサ用ライブラリとプログラム

URL ([https://github.com/adafruit/Adafruit\\_Python\\_ADXL345](https://github.com/adafruit/Adafruit_Python_ADXL345)) のライブラリをインストールし, 計測用のプログラムを作成した。言語はインタプリタ型の高水準汎用プログラミング言語である「Python3」である。データはヘッダーなしスペース区切りのテキストファイルとして保存される。

### 4.2.4 加速度センサ

加速度センサは, 3 軸加速度センサモジュール「ADXL345 (SPI/IIC)」 (<https://www.analog.com/jp/products/adxl345.html>) を使用した。図 4.5 に加速度センサ概況を示す。以下の手順でセンサ部分の製作を行い, シングルボードコ

ンピューター「Raspberry Pi」とセンサの接続にピンソケットを用いることでスムーズな着脱が可能になり、作業性が向上した。

#### (1) センサ箇所へのリード線の装着

センサ箇所にリード線を半田付けし、保護用の熱収縮チューブを被せる。

#### (2) ピンソケット部へのリード線の装着

加速度センサのピンソケット部に電線を半田付けする。

#### (3) 加速度センサの防水・防汚処理

加速度センサの防水・防汚処理として、二液混合のエポキシ樹脂を塗布する。



図 4.5 3 軸加速度センサ

### 4.3 実験方法および詳細

#### 4.3.1 使用した材料およびコンクリートの配合

実験に使用したコンクリートの使用材料を表 4.1、配合表を表 4.2 に示す。配合は、プレキャストコンクリート工場で使用している製品用配合である。工場製品用の配合であるため、Non-Air タイプのコンクリートである。

表 4.1 使用材料詳細

種類		産地、品質等
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 $3.16\text{g/cm}^3$
細骨材	砕砂	徳島県阿波市産、硬質砂岩、密度 $2.57\text{g/cm}^3$
	高炉スラグ細骨材	広島県福山市産、密度 $2.77\text{g/cm}^3$
粗骨材	砕石2005	徳島県阿波市産、硬質砂岩、密度 $2.58\text{g/cm}^3$
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

目標スランプは 10cm であるが、練り上がり直後のスランプは 15cm ほどであ

り、スランプロスさせて、実験に供した。細骨材率は一定であり、スランプの変化は、モルタルの粘性のみによるものとした。

表 4.2 使用したコンクリートの配合

種類	粗骨材の Gmax (mm)	スランプ の範囲	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
35N-20	20	10±2.5cm	41.5	43	174	420	743	989	3.36

#### 4.3.2 加振ボックス充填装置および鋼製フレーム

無線加速度計測システムを使用し、計測する試験器具として、土木学会基準「ボックス形容器を用いた加振時のコンクリートの間隙通過性試験方法(案)(JSCE-F 701-2016)」の加振ボックス充填装置とした。図 4.6 に加振ボックス充填装置および鋼製フレームの外観を示す。加振ボックス充填装置は、スランプ試験では評価することが困難なコンクリートの施工性能を評価する試験方法である<sup>4)</sup>。加振ボックス充填装置は、図 4.7 に示すように A 室・B 室に分かれており、2 室間に鉄筋障害および仕切り版を設置する。鋼製フレームは、加振ボックス充填装置を通じた振動を断ち切り、フレッシュコンクリート内部の加速度のみを計測するために用いた。センサの初期位置は図 4.7 に示す位置にφ2mm の真鍮線を用いて鋼製フレームより垂らす方法でセンサを固定する。



図 4.6 加振ボックス充填装置および鋼製フレーム

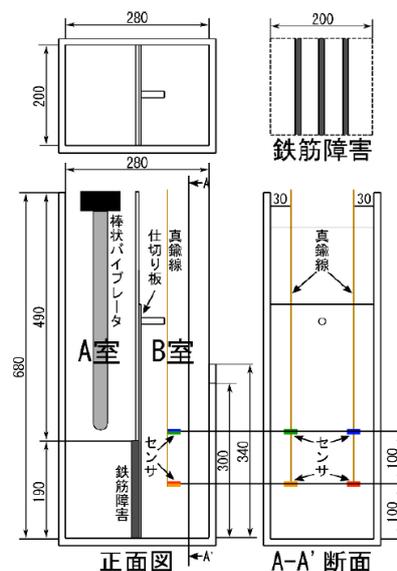


図 4.7 加振ボックス充填装置内およびセンサ取付け位置

### 4.3.3 内部振動機および可変変圧器

内部振動機（棒状バイブレータ）の仕様を表 4.3 に示す。また、可変変圧器を用いて内部振動機の出力を変更した場合の計測についても実施した。

表 4.3 内部振動機の仕様

全長 (mm)	重量 (kg)	出力 (W)	電流 (A)	振動部/径×長 (mm)
784	5	280	5	28×475

### 4.3.4 実験方法

加振ボックス充填実験は、シリーズ 1 とシリーズ 2 から構成し、各シリーズ別詳細を下記に記載する。

#### (1) シリーズ 1

加振ボックス充填装置を用いて、練混ぜられたフレッシュコンクリートを A 室から B 室へ流動させ実験を行う。以下に手順を示す。

- 1) シングルボードコンピューター、ノート PC を起動する。その後、加速度センサを固定した真鍮線を、鋼製フレームを用いたボックス充填試験装置の所定の位置に設置する。
- 2) コンクリートを A 室側に充填した後に、内部振動機を挿入する。
- 3) ノート PC のコマンドプロンプトより、シングルボードコンピューターへの SSH 接続を行う。
- 4) ノート PC よりシングルボードコンピューターに計測開始のコマンドを送信する。
- 5) ボックス充填装置の仕切り版を開放すると同時に内部振動機による加振を開始する。
- 6) B 室側の 300mm ラインに到達した時点で計測を終了する。

#### (2) シリーズ 2

可変変圧器を用いて内部振動機の出力調整を行い、加速度の差を計測した。

- 1) シリーズ 1 の 1)と同様である。
- 2) A, B へ室コンクリートを充填し、突き棒を用いて締固めを行う。
- 3) シリーズ 1 の 3)~4)と同様である。

- 4) 内部振動機による加振を開始する。可変変圧器を用いて AC 電圧を変化させ、内部振動機の出力を変更する。

#### 4.3.5 計測データの整理

計測したデータのサンプリング間隔は 800Hz である。式 (4.1) で計算を行い、合成加速度を求めた。

$$\text{合成加速度} = \sqrt{\text{acc}X^2 + \text{acc}Y^2 + \text{acc}Z^2} - g \quad (4.1)$$

ここに  $\text{acc}x$  : x 軸方向の加速度 ( $\text{m/s}^2$ )

$\text{acc}y$  : y 軸方向の加速度 ( $\text{m/s}^2$ )

$\text{acc}z$  : z 軸方向の加速度 ( $\text{m/s}^2$ )

$g$  : 標準重力加速度 ( $\text{m/s}^2$ )

#### 4.4 実験結果および考察

##### 4.4.1 各シリーズにおけるフレッシュコンクリートの性状

表 4.4 にシリーズ 1 およびシリーズ 2 のフレッシュコンクリートの性状を示す。シリーズ 1 は、スランプの小さい順に記載しているが、充填試験は、スランプ 12cm→8cm→4cm→20cm の順に実施した。スランプ 4cm から 20cm には高性能減水剤を後添加し、強制的にスランプを増大させた。シリーズ 2 は複数回の計測を行ったため、代表値を記載した。

表 4.4 各シリーズにおけるフレッシュコンクリートの性状

実験	スランプ (cm)	空気量 (%)
シリーズ1	4.0	2.7
	8.0	2.7
	12.0	2.7
	20.0	2.7
シリーズ2	14.0	2.7

##### 4.4.2 実験：シリーズ 1

図 4.8 にスランプ 4cm での計測結果を示す。図 4.7 のセンサの色および図

4.8 のグラフの色は対応している。300mm ライン到達までに要する時間は、計測開始から 61 秒であった。全てのセンサで、5~10 秒にかけて合成加速度が計測され始め、その値の大きさに差はあるものの、20~40 秒にかけて  $100\sim 200\text{m/s}^2$  まで合成加速度が増大し、ピークを迎える。その後は合成加速度が緩やかに減少しているような傾向がみられた。

図 4.9 にスランプ 8cm での計測結果を示す。300mm ライン到達までに要する時間は、計測開始から 40 秒であった。0~12 秒にかけてはバイブレータによる加振を行っていない時間である。8 秒付近にみられる  $150\sim 200\text{m/s}^2$  程度まで合成加速度が大きく卓越しているのは、仕切り板解放時にセンサを固定している真鍮線に触れてしまったことによるノイズであると思われる。12 秒前後から徐々に合成加速度が計測され、①では 25 秒付近で  $150\text{m/s}^2$ 、②では約 35 秒で  $200\text{m/s}^2$ 、③では約 28 秒で  $100\text{m/s}^2$ 、④では約 35 秒で  $150\text{m/s}^2$  程度の加速度が計測された。その後は①、②のセンサで合成加速度が徐々に減少していることが分かる。よって、スランプ 8cm の場合でも、スランプ 4cm の場合と同様の傾向がみられた。

図 4.10 にスランプ 12cm での計測結果を示す。300mm ライン到達までに要する時間は、計測開始から 40 秒であった。スランプ 8cm の場合でも述べたように、9 秒付近にみられる  $70\sim 190\text{m/s}^2$  程度まで合成加速度が大きく卓越しているのは、仕切り板を解放する際にセンサを固定している真鍮線に触れたことによるノイズである。10 秒付近から合成加速度が計測され 30 秒前後で  $90\sim 150\text{m/s}^2$  程度のピークを迎え、その後の合成加速度は緩やかな減少傾向にある。

図 4.11 にスランプ 20cm での計測結果を示す。300mm ライン到達までに要する時間は、計測開始から 36 秒であった。10 秒付近から加速度が計測され ①、③では約 20 秒で  $100\text{ m/s}^2$  程度、②では約 25 秒で  $200\text{m/s}^2$  程度の④では約 25 秒で  $150\text{m/s}^2$  程度のピークを迎えていることが分かる。

計測結果より、ほぼ合成加速度が計測されていない状態から、急激に合成加速度が増大しピークを迎える傾向がみられた。また、合成加速度のピーク後は計測を終了する 300mm ラインに近づくにつれて、徐々に減少する傾向が確認された。

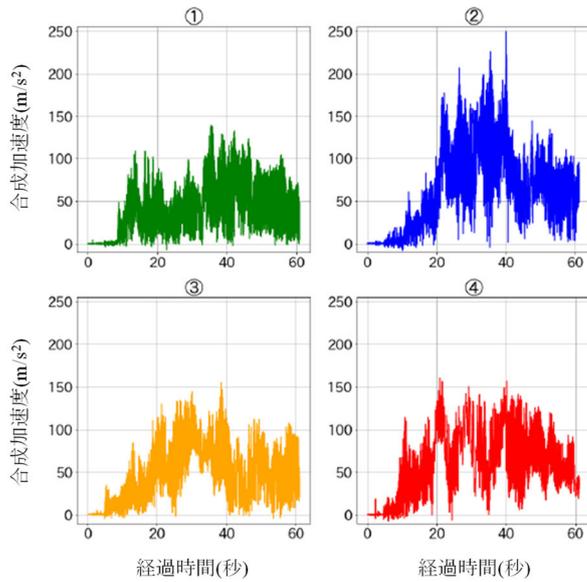


図 4.8 スランプ 4cm の計測結果

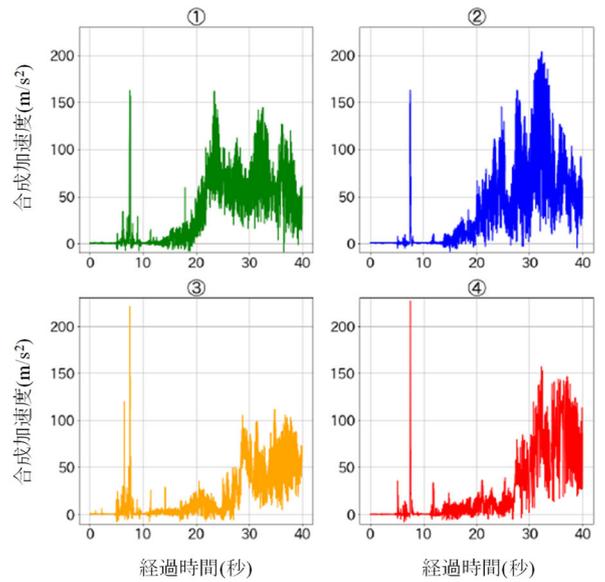


図 4.9 スランプ 8cm の計測結果

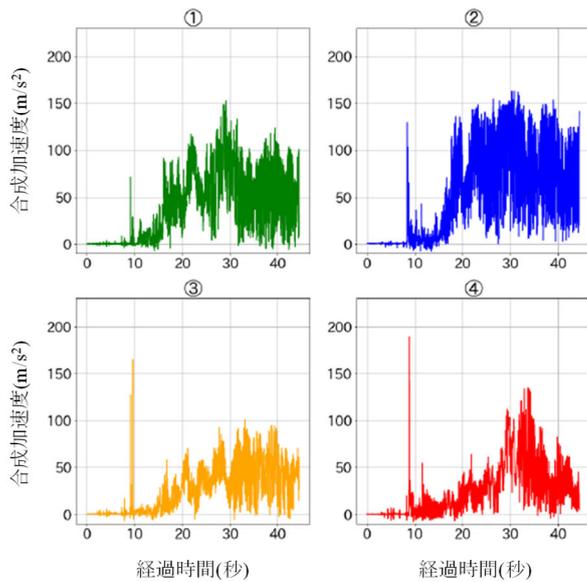


図 4.10 スランプ 12cm の計測結果

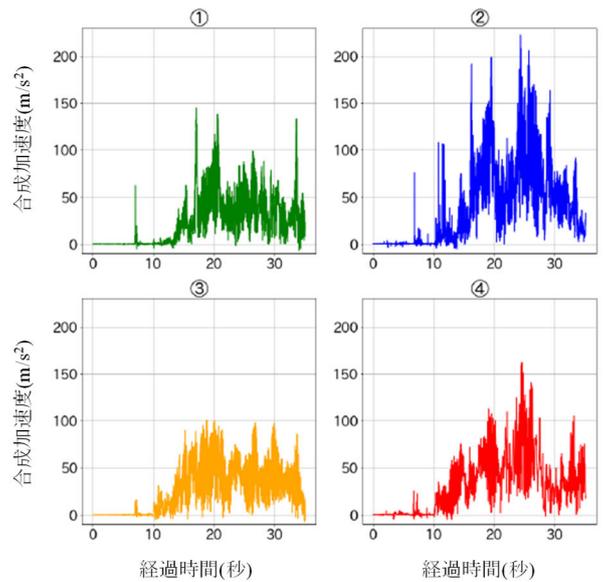


図 4.11 スランプ 20cm の計測結果

図 4.12 に実験時の加振ボックス充填装置を流動するフレッシュコンクリートの挙動の概要図を示す。I は仕切り板を解放し、内部振動機による加振を開始した直後の状態である。この状態では、フレッシュコンクリートは鉄筋障害の上部から崩れるように A 室側から B 室へ流入する。このときセンサを固定し、フレームから吊り下げている真鍮線はフリーの状態であるため、センサは自由に動くことができる。そのため、B 室へ流入するフレッシュコンクリート

がセンサに触れると、合成加速度が計測される。流入するコンクリートの量が増加すると共に計測される合成加速度は増大すると考えられ、この状態の時に合成加速度が立ち上がりその後ピークを迎えると考えられる。ⅡはB室へ流入したコンクリートが充填されていき、③、④の底面から100mmの位置に設置したセンサをコンクリートで覆っているような状態である。この状態では真鍮線およびセンサの一部がフレッシュコンクリートに覆われているため、センサの動きは抑制されると考えられる。よって、①の状態よりもセンサの自由度は低くなる。これにより計測される合成加速度は減少していくと考えられる。Ⅲは①、②の上側のセンサもフレッシュコンクリートに覆われた状態である。この状態になると、①から④のセンサおよび真鍮線を全てフレッシュコンクリートで覆っているような状態である。そのためⅡの状態より更に計測される合成加速度は小さくなると考えられる。

また、本実験では、スランプの違いによる加速度の差はあまり見られなかったが、これは加振ボックス充填装置が小型であり、内部振動機とセンサとの距離が近いことが影響し、計測される合成加速度にあまり差が出なかったのではないかと推察する。

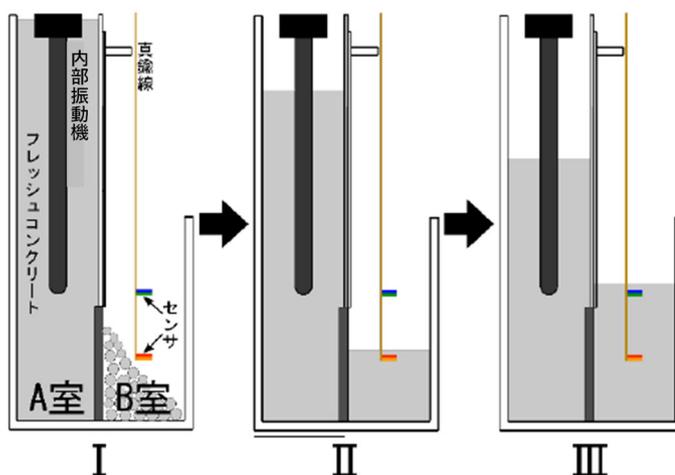


図 4.12 加振ボックス充填装置内を流動するフレッシュコンクリートの挙動

#### 4.4.3 実験：シリーズ 2

可変変圧器を用いて、内部振動機の出力量調整を行った場合の計測を行った。内部振動機の出力量は、100V から 60V まで変化させ、合成加速度は連続して計

測した。表 4.5 に各区分による計測時間と可変変圧器の出力電圧を示す。また、計測結果を図 4.13 に示す。

表 4.5 各区分の計測時間と出力電圧（内部振動機）

区分	計測時間 (秒)	出力電圧 (V)
a	5~25	100
b	25~37	80
c	37~60	60
d	60~75	80
e	75~95	100

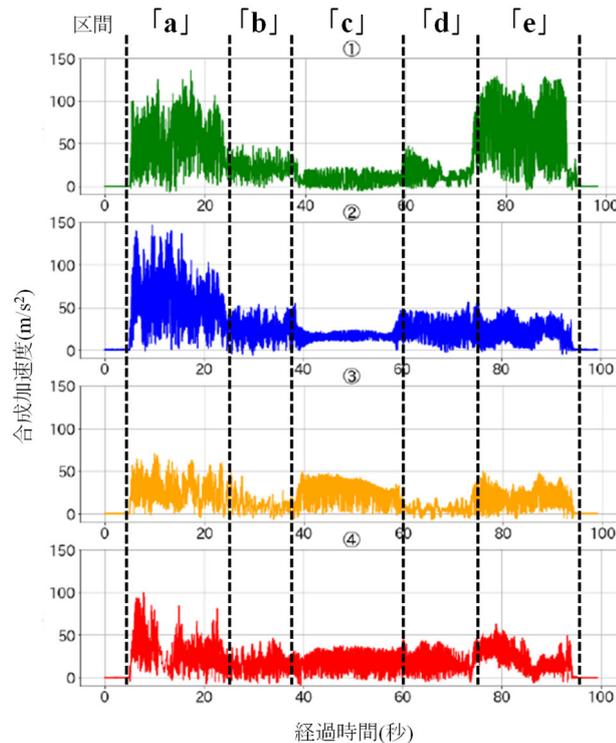


図 4.13 内部振動機の出力変化させた場合の合成加速度の計測結果

内部振動機の出力を 100V とした「a」区間である 5~25 秒では、①、②のセンサでは  $100\sim 140\text{m/s}^2$  程度の合成加速度を計測しているが、③、④のセンサでは  $50\text{m/s}^2$  程度であり、①、②と比べて加速度が小さい結果となった。これは、①、②の底面から 200mm に設置したセンサの方が、③、④の底面から 100mm に設置したセンサよりも内部振動機との直線距離が近いと考えられる。

「b」区間の 25~37 秒では内部振動機の出力を 80V まで低減させた。その結果、①、②のセンサでは加速度が  $50\text{m/s}^2$  程度まで低下した。「a」区間と比較しても明らかに合成加速度が減少し、内部振動機の出力が低下したことが影響を及ぼしている。しかし、③、④のセンサでは  $20\sim 40\text{m/s}^2$  程度で、「a」区間と比較すると、合成加速度は減少しているものの、①、②のセンサほどの変化はみられなかった。これは前項でも述べたように③、④のセンサは①、②のセンサより、内部振動機との距離が遠く、加速度が計測されなかったと考えられる。

「c」区間、37~60 秒では、内部振動機の出力を更に下げ、60V とした。①、②では約  $25\text{m/s}^2$  の加速度が計測された。「b」区間よりもさらに計測される合成加速度が低下しており、内部振動機の出力が低下したことを反映している。しかし、③では  $50\text{m/s}^2$  加速度であり、④では  $40\text{m/s}^2$  程度の加速度であった。④では「b」区間と加速度の値にほぼ差はなく、③では内部振動機の出力が 80V から 60V に減少しているにも関わらず、加速度が大きくなる結果となった。この原因としては、センサの位置が変化したことが考えられる。センサは真鍮線に固定し、鋼製フレームから垂らして計測を行っている。このような設置方法を行っているのは、型枠の壁等を媒介した振動を計測することを防ぐためである。図 4.14 にシリーズ 2 実験時の概略図を示す。I は A・B 室へフレッシュコンクリートを詰め、突き棒を用いて締固めを行った状態である。この状態でセンサは図-1 に示す初期位置付近にある。その後、内部振動機による加振を開始すると、フレッシュコンクリートは充填が行われ、ゆっくりと流動する。また、センサは強く固定されておらず、フリーな状態であるため、センサの位置はフレッシュコンクリートの流動と共に変化する。これが II に示す状態である。これによりセンサの位置が移動したため、内部振動機との位置関係が変化し前述のような結果になったものと推測する。

「d」区間の 60~75 秒では、内部振動機の出力を 80V へ上げた。①、②のセンサでは、 $50\text{m/s}^2$  程度の加速度が計測され、「b」区間と同程度であった。③では  $20\text{m/s}^2$  まで低下し、④では約  $40\text{m/s}^2$  と、「c」区間とあまり差が見られない結果となった。これは前述したように、センサの位置が変化したためである。

「e」区間、75~95 秒では、内部振動機の出力を再度 100V へ上げた。①のセンサでは  $100\sim 140\text{m/s}^2$  程度の合成加速度が計測され内部振動機の出力が 100V

である「a」区間と近い合成加速度が計測された。②，③，④では「d」区間とあまり変化はなく， $40\sim 50\text{m/s}^2$ 程度の結果となった。前述したとおり，センサの位置が変化したためと考えられ，センサの固定方法は今後の検討課題としたい。

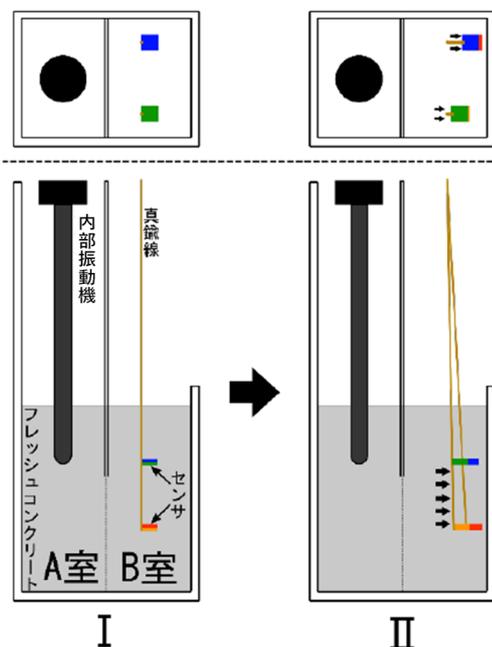


図 4.14 フレッシュコンクリートと同様に流動する加速度センサの概略図

#### 4.5 本章のまとめ

最新の IoT 技術を導入し，シングルボードコンピューターと圧電素子の 3 軸加速度センサを使用した充填過程のプレキャストコンクリートを想定したフレッシュコンクリートの合成加速度の時系列データを通信規格 IEEE802.15.4 の環境下で遠隔，かつ同時多点計測を実施した

本実験で得られた結果を以下に記す。

- (1) シングルボードコンピューターと加速度センサ，通信規格 IEEE802.15.4 を用いた無線加速度計測システムを開発し，加振ボックス充填装置内を流動するコンクリートの合成加速度を計測することが可能となった。
- (2) 加振ボックス充填装置の B 室内において，任意の位置における合成加速度は異なる。
- (3) 合成加速度が変化する要因は，内部振動機と加速度センサの距離減衰が主たる要因である。

今回、プレキャストコンクリート工場で実際に使用されている配合にて実験を行い、通信規格 IEEE802.15.4 を用いた無線加速度計測システムにてフレッシュコンクリートの伝搬加速度を直接的に計測できることが可能となった。一方で、課題としては、一部有線となっており、完全無線化の計測システムではないこと、加速度センサの固定方法が挙げられる。

#### 第 4 章の参考文献

- 1) 山内匡，千賀年浩，野口貴文，北垣亮馬，西島茂行，山本秀之：型枠に設置したセンサによるコンクリート締固め時の加速度測定に関する実験，土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集，VI部門，pp.1543-1544，2017.9
- 2) 昭和測器株式会社：簡易型衝撃加速度計，<https://www.showasokki.co.jp/>
- 3) 東京測器株式会社：低容量加速度計，<https://www.tml.jp/>
- 4) 浦野真次，橋本紳一郎，橋本親典，綾野克紀：土木学会「施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針 [2016 年版]」の概要，コンクリート工学，Vol.54 No.10，pp.987-992，2016.10

## 第5章 プレキャストコンクリートを想定したコンクリートの模擬型枠内に充填される伝搬加速度の計測

### 5.1 はじめに

第4章にて、通信規格 IEEE802.15.4 の環境において、シングルボードコンピュータと静電容量式加速度センサを組み合わせた遠隔、かつ同時多点計測を可能とした加速度計測システムを開発した。

本章では、この同時多点加速度計測システムの有用性および現実性を確認するためにプレキャストコンクリート工場で製造される配合のコンクリートを用いて、模擬型枠内における振動締固め途中のフレッシュコンクリート内部の加速度計測を実施し、その有用性を評価について、実験的検討を行った。

### 5.2 実験詳細および方法

#### 5.2.1 使用した材料およびコンクリートの配合（4.4.1 同様）

実験に使用したコンクリートの使用材料を表 5.1、配合表を表 5.2 に示す。

細骨材は、砕砂と高炉スラグ細骨材 BFS5 を 1:1（質量比）で混合した。配合は、ボックスカルバートや U 型側溝を製造するプレキャストコンクリート製品工場で実際に使用している配合である。なお、設計基準強度は  $35.0\text{N/mm}^2$ 、配合強度は  $38.9\text{N/mm}^2$  となっている。工場製品用の配合であるため、Non-Air タイプのコンクリートとした。

表 5.1 使用材料詳細

種類		産地、品質等
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 $3.16\text{g/cm}^3$
細骨材	砕砂	徳島県阿波市産、硬質砂岩、密度 $2.57\text{g/cm}^3$
	高炉スラグ細骨材	広島県福山市産、密度 $2.77\text{g/cm}^3$
粗骨材	砕石2005	徳島県阿波市産、硬質砂岩、密度 $2.58\text{g/cm}^3$
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

目標スランプは 10cm であるが、練り上がり直後のスランプを 18cm 程度とした。その後、経時変化によるスランプロスをさせつつ、実験を行った。

表 5.2 使用したコンクリートの配合

種類	粗骨材の Gmax (mm)	スランブ の範囲	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
35N-20	20	10±2.5cm	41.5	43	174	420	743	989	3.36

### 5.2.2 フレッシュコンクリートの加速度計測装置

フレッシュコンクリートの加速度の測定には図 5.1 (図 4.4 同様) に示すシングルボードコンピューターを用いて作製された加速度計測装置を用いた。表 5.3 (4.2.4 同様) に加速度センサの概要を示す。シングルボードコンピューターを通じて加速度センサを組込んだ装置となっている。

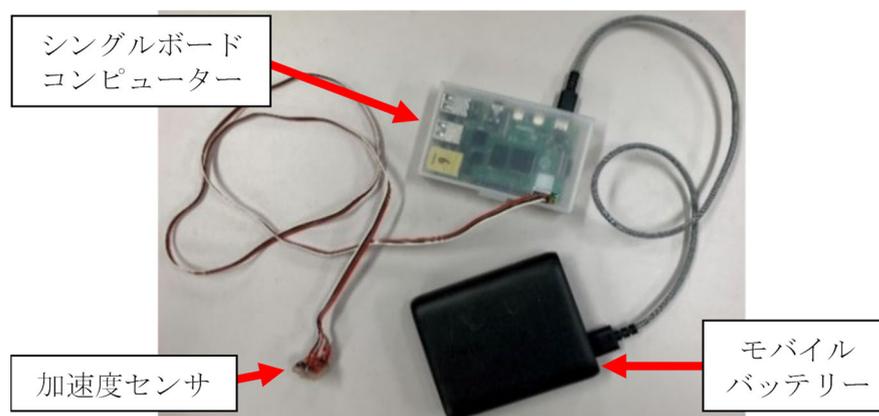


図 5.1 加速度計測装置

表 5.3 静電容量式加速度センサの概要

型式	測定範囲	サンプリング間隔	消費電力 (測定時)	消費電力 (待機時)	適用温度
ADXL345	16G	800Hz	57.5μW	0.25μW	-55°C~+105°C

加速度計測装置は、コンピュータの遠隔操作方法の 1 種である SSH 接続を市販のルータによってネットワークを構築させ、SSH 接続を用いてパソコンとの接続を行い、測定開始コマンド送信や測定終了コマンド送信、計測データの採取を行った。また、センサ部分についてはエポキシ接着剤を用いて防水・防汚加工を施し、加速度計測装置の電源はモバイルバッテリーを使用した。

なお、本加速度計測装置で得られる加速度のデータ処理については、サンプル

リング間隔 800Hz とし，式 (5.1) (式 4.1 同様) で合成加速度を算出した。

$$\text{合成加速度} = \sqrt{\text{acc}X^2 + \text{acc}Y^2 + \text{acc}Z^2} - g \quad (5.1)$$

ここに  $\text{acc}x$  : x 軸方向の加速度 (m/s<sup>2</sup>)

$\text{acc}y$  : y 軸方向の加速度 (m/s<sup>2</sup>)

$\text{acc}z$  : z 軸方向の加速度 (m/s<sup>2</sup>)

$g$  : 標準重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)

### 5.2.3 模擬型枠による締固め試験概要

模擬型枠の全体概要を図 5.3，使用した内部振動機を図 5.4 および内部振動機の規格を表 5.4 に示す。



図 5.3 模擬型枠の全体概要



図 5.4 使用した内部振動機

表 5.4 内部振動機の規格

型式	出力	電圧	電流	周波数	振動数	振動部
HBM50VA	400W	48V	9.0A	200/240Hz	200/240Hz	φ52×L385mm

模擬型枠は，高密度配筋のコンクリート構造物（プレキャストコンクリート製品含む）を模擬した充填容器である。これらの充填容器内に加速度センサを設置（図 5.6，表 5.5）した。加速度計測装置は，1 組のシングルボードコンピュータと加速度センサから構成されており，順次作製し，加速度センサの番号は 01，02，03，04，05 の 5 個となっている。

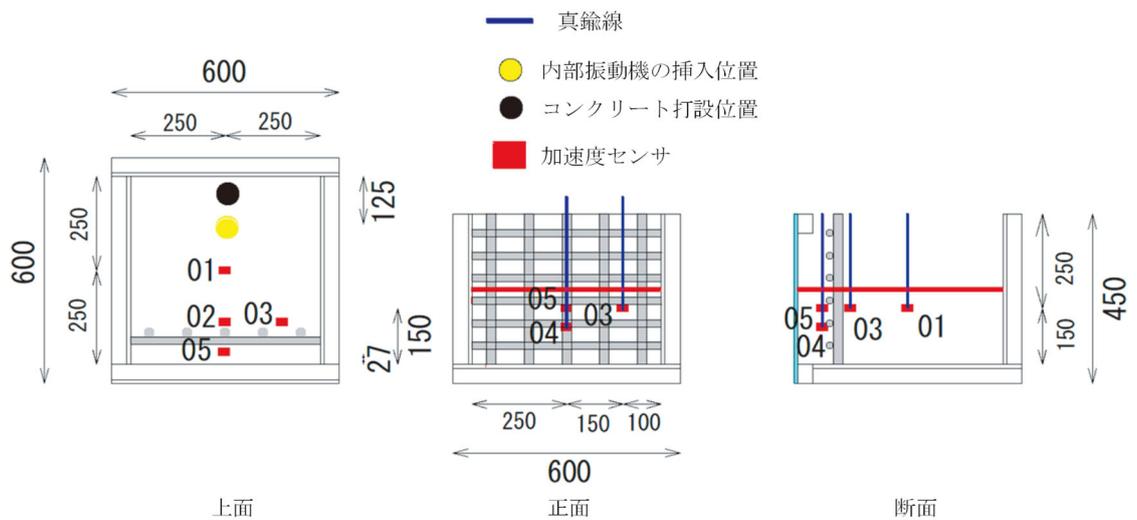


図 5.6 模擬型枠内に設置した加速度センサの位置詳細

表 5.5 加速度センサの 3 次元方向における設置位置

センサ番号	X方向 (mm)	Y方向 (mm)	Z方向 (mm)
01	250	250	150
02	250	113	150
03	400	113	150
04	250	27	100
05	250	27	150

練混ぜたコンクリートは漏斗を用いて打設した。模擬型枠の容量は約 60 リットルである。その後、内部振動機を所定の位置に挿入し、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。加速度センサは、流動するコンクリート中を動くことになる。このため、後述する真鍮を用いて流される範囲をある程度固定した。加速度センサ自体の流動は発生するが、センサの角度等は大きく変化していなかったため、計測はできていたと考えられる。さらに、センサ番号 04 とセンサ番号 05 は、加速度計直上の真鍮を鉄筋にプラスチック製の結束バンドで括り付けた (図 5.7)。また、模擬型枠自体を介して内部振動機の振動をセンサが計測しないようにするため、鋼製フレームを導入し、鋼製フレームは、垂直部材、水平部材および足場から構成されるものとした。さらに真鍮製の棒に加速度センサを括りつけたものを鋼製フレームに設置し、模擬型枠上から模擬型枠内に垂らすようにして実験を行った。実際の実験状況を含めて、前

述の事項詳細を図 5.8, 図 5.9 および図 5.10 に示す。

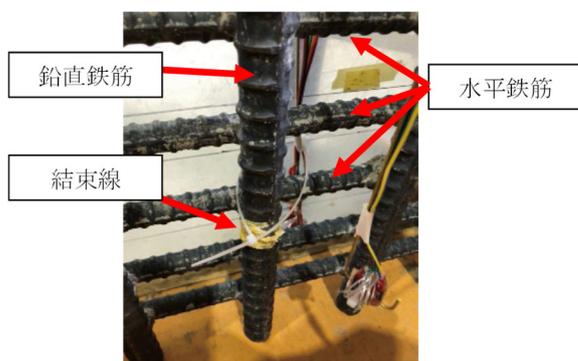


図 5.7 結束されたセンサ状況



図 5.8 設置した鋼製フレームの概要

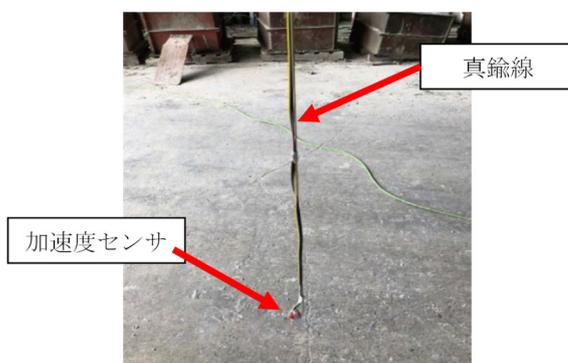


図 5.9 真鍮線に括り付けたセンサ

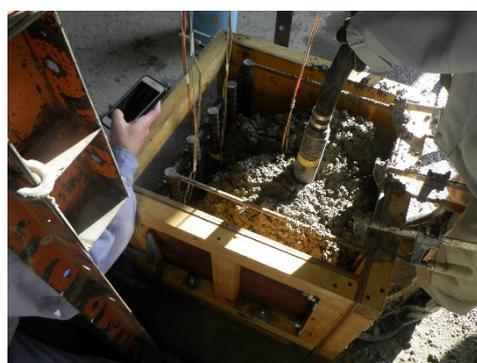


図 5.10 実験状況

### 5.3 実験結果および考察

#### 5.3.1 実験に使用したコンクリートのフレッシュ性状

実験に使用したコンクリートのフレッシュ性状を表 5.6 に示す。

最初に 400 リットル程度のコンクリートを練混ぜ、スランプ試験等のフレッシュ性状の試験を行い、締固め実験を実施し、模擬型枠内のコンクリートを廃棄した。その後、残ったコンクリートを用いて、2 回目のフレッシュ性状の試験でスランプを確認し、締固め実験を実施した。これらを繰り返し行った。その結果、コンクリートの練混ぜ直後は、スランプ 18.0cm であったが、締固め実験を繰り返すことによって、スランプが 5.0cm まで低下した。その後、高性能減水剤を後添加することによって、スランプを 23.0cm まで増加させて、締固め実験を行った。

表 5.6 使用したコンクリートのフレッシュ性状

実験番号	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
1	18.0	2.7	13.8
2	12.0	3.0	14.6
3	9.0	3.0	13.6
4	7.0	3.0	16.0
5	5.0	3.0	16.2
6	23.0	2.3	17.1

### 5.3.2 スランプ 18.0cm における合成加速度の計測結果

図 5.11 にスランプ 18.0cm における合成加速度の計測結果を示す。

センサ番号は，01，02，03，04，05 となっており，図 5.6 と対応している。各グラフの黒実線は 10 点毎の移動平均である。内部振動機に最も近いセンサ番号 01 のグラフでは，加速度が  $250\text{m/s}^2$  を超える合成加速度を記録している。センサ番号 01 から 140mm 程度離れたセンサ番号 03 と比較すると，全体的に加速度の値が 50% 以下になっていることが確認できる。締固め作業時におけるフレッシュコンクリートに伝搬する加速度の減衰を定量的に捉えることができていると考える。なお，センサ番号 03 のグラフに一部遮断が見られるが，計測時のエラーと推察する。

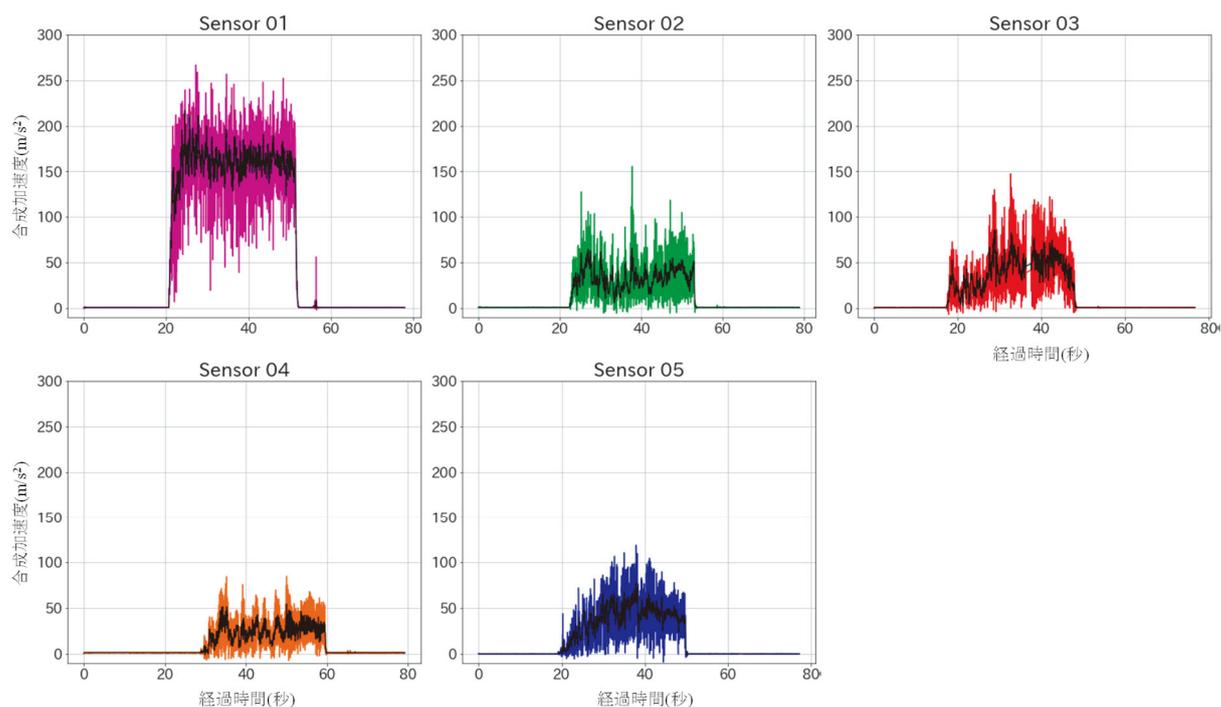


図 5.11 スランプ 18.0cm における合成加速度の計測結果

### 5.3.3 スランプ 12.0cm における合成加速度の計測結果

図 5.12 にスランプ 12.0cm における合成加速度の計測結果を示す。

スランプが 12.0cm の場合においても，センサ番号 01 とセンサ番号 03 の位置では伝搬する加速度が 50%程度に減衰していることが確認できた。一方で，内部振動機の稼働終了時のセンサの位置は元々設置した位置からコンクリートの流動方向へ流されているのを確認した。特に，内部振動機の直線上にあるセンサはコンクリートの流動の影響を受けやすく，計測に影響を及ぼしていると考えられる。

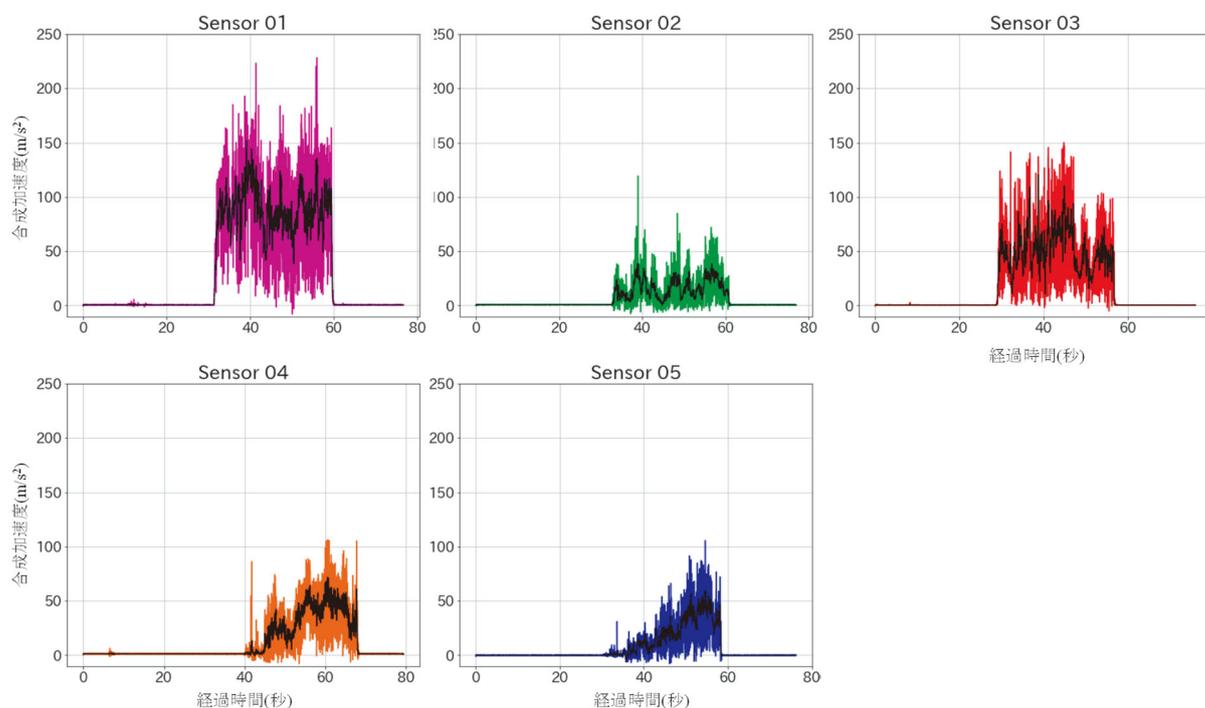


図 5.12 スランプ 12.0cm における合成加速度の計測結果

### 5.3.4 スランプ 9.0cm における合成加速度の計測結果

図 5.13 にスランプ 9.0cm における合成加速度の計測結果を示す。

スランプが 9.0cm の場合においても，スランプ 18.0cm および 12.0cm の試験結果と同様にセンサ番号 01 とセンサ番号 03 の位置では伝搬する加速度が 50%程度に減衰していることが確認できた。また，一部の加速度センサでは，コンクリートの流動の影響を受けやすく，計測への影響が発生しているものと推察する。

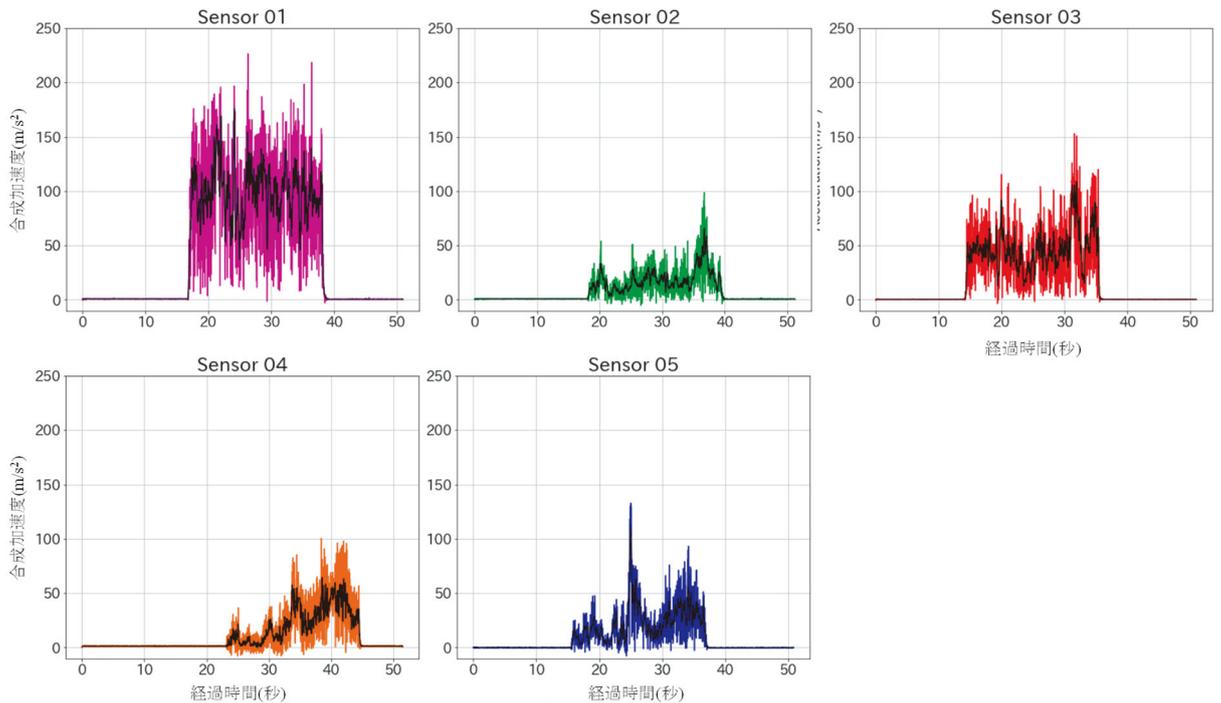


図 5.13 スランプ 9.0cm における合成加速度の計測結果

### 5.3.5 スランプと計測位置における平均合成加速度との関係

合成加速度の時系列データの統計値として、5箇所センサー別に、加振開始から終了時の合成加速度の10点ごとの移動平均を取った数値の平均値と偏差を求めた。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偏差を取った。なお、センサごとに測定開始コマンドを送信しているため、一定区間はスランプ毎で数十秒間程度異なっている。

表 5.7 にセンサ番号別に、締固め実験の合成加速度の統計値とスランプの関係を示す。内部振動機の最も近くにあるセンサ番号 01 が  $107.7\text{cm/s}^2$  と最も大きく、鉄筋かごの左部に位置するセンサ番号 03 が  $41.5\text{cm/s}^2$  とセンサ番号 05 が  $23.0\text{cm/s}^2$  と小さくなる。締固め作業時にフレッシュコンクリート自体に伝搬する加速度の減衰を定量的に捉えることができた。しかし、一部のセンサにおいてはコンクリートの流動の影響による計測への影響が発生していると考えられ、検討が必要である。

内部振動機に最も近いセンサ番号 01 とセンサ番号 03 を比較すると流動の影響もあるが、140mm 程度の間で伝搬する平均加速度はセンサ番号 01 に比べて 40% 程度までに減衰していることが確認された。

表 5.7 センサ番号別の合成加速度と測定スランプとの関係（統計指標）

センサ番号	スランプ (cm)	測定時間 (秒)	測定データ数 (個)	平均合成加速度 (cm/s <sup>2</sup> )	標準偏差 (cm/s <sup>2</sup> )	変動係数 (%)	
01	23.0	21.5-34.4	720	85.3	107.7	33.2	38.9
	18.0	20.2-52.4	1,790	152.0		36.6	24.1
	12.0	31.4-60.2	1,610	86.3		23.9	27.7
	9.0	16.8-38.9	1,230	95.1		28.9	30.4
	7.0	12.5-34.0	1,200	148.0		42.2	28.5
	5.0	11.0-41.0	1,620	79.3		24.0	30.2
02	23.0	22.5-35.1	610	48.0	25.7	10.9	22.7
	18.0	22.3-53.8	1,530	32.1		12.4	38.6
	12.0	32.6-61.1	1,380	16.0		8.6	54.0
	9.0	18.2-40.0	1,060	17.9		10.4	58.4
	7.0	14.2-34.8	100	19.4		11.2	57.9
	5.0	12.2-41.5	1,420	20.6		10.9	53.0
03	23.0	19.7-32.1	690	65.5	41.5	25.7	39.3
	18.0	17.1-48.8	1,700	38.4		18.4	47.8
	12.0	28.7-57.8	1,620	48.7		21.1	43.2
	9.0	14.3-36.0	1,210	45.3		18.8	41.4
	7.0	08.9-29.4	1,140	28.1		14.9	53.3
	5.0	08.0-37.1	1,620	22.9		13.3	58.1
04	23.0	28.3-41.1	1,250	34.8	28.4	22.2	63.9
	18.0	28.3-60.0	3,200	23.6		10.5	44.5
	12.0	40.4-68.2	2,770	30.4		18.2	59.7
	9.0	23.0-44.9	2,090	22.4		16.4	73.2
	7.0	20.5-40.8	1,940	36.3		30.7	84.6
	5.0	17.9-46.5	2,810	22.9		17.3	75.2
05	23.0	21.3-33.4	670	21.8	23.0	18.2	83.4
	18.0	19.2-50.1	1,720	37.6		16.6	44.1
	12.0	30.0-58.5	1,590	18.5		16.0	86.7
	9.0	15.7-37.1	1,195	22.6		15.7	69.7
	7.0	10.3-31.4	1,170	25.1		19.2	76.3
	5.0	09.6-38.2	1,590	12.5		9.0	72.2

また、鉄筋かごの内側であるセンサ番号 03 とセンサ番号 05 の平均合成加速度を比較すると、加速度は概ね同じであり、鉄筋の有無は合成加速度の伝搬において影響が少ないことが確認できた。さらに、図 5.14 に示すスランプの平均値に着目した締固め途中のフレッシュコンクリートに伝播する加速度は、スランプの大きさにあまり影響を受けていないように思われる。

國府らの研究では、限界加速度と 0.0cm～12.0cm のスランプの関係は、反比例になる報告されている<sup>1)</sup>。締固めに必要な最小の加速度は、スランプが小さくなるほど大きくなる。ただし、6.0cm～12.0cm のスランプの限界加速度はほぼ一定であり、硬練りコンクリートになるほど、加速度が伝播されにくくなる。一方、梁らの研究<sup>2)</sup>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 8.0cm～15.0cm の加速度の分布形状がほぼ同じという計測の結果が報告されている。これらの知見をまとめると、硬練りコンクリートでなければ、内部振動機によって伝播される加速度はスランプには依存されないということになる。本研究では、スランプ 5.0cm～23.0cm を対象としたコンクリートである。そのため、スランプには依存しなかったと思われる。

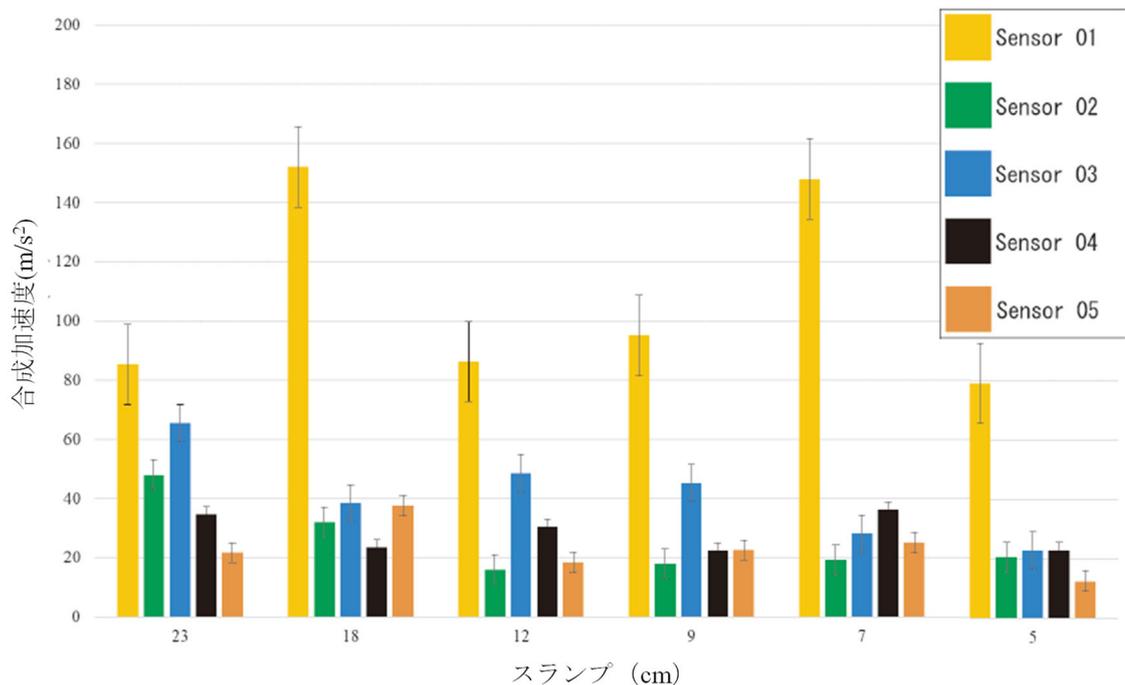


図 5.14 各センサ位置における測定スランプと合成加速度との関係

#### 5.4 本章のまとめ

プレキャストコンクリート工場で製造される配合のコンクリートを用いて、模擬型枠内における振動締固め途中のフレッシュコンクリート内部の加速度計測を実施し、その有用性の評価について、実験的検討を行った。

本実験で得られた結果を以下に記す。

- (1) 型枠外部からの加速度計測ではなく、締固め途中のフレッシュコンクリート自体の加速度計測手法を示すことができた。
- (2) 締固め時に流動するフレッシュコンクリート内部に発生する加速度は、配筋されている鉄筋による障害や距離の減衰によって減少するということが数値をもって示された。
- (3) 締固め途中の流動するフレッシュコンクリート内部の加速度はスランプにほぼ依存しない。

前章と同様の計測システムを用いて、プレキャストコンクリートを想定した鉄筋コンクリート模擬型枠に締固められるフレッシュコンクリートの加速度を直接的に計測することができたものとする。しかしながら、本実験のフレッシュコンクリートの伝搬加速度を計測するシステムは、完全なる無線化ではな

いこと，また最適な加速度センサの固定方法等の課題がある。従って，引き続き前述事項への更なる改善および改良が必要である。

## 第 5 章の参考文献

- 1) 國府勝郎ほか：硬練りコンクリートの締固め性評価について，JCI コンクリートの品質評価に関するシンポジウム論文集， pp.117-124， 1998
- 2) 梁俊，丸屋剛，坂本淳，井櫻潤示：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， Vol.75， No.2， pp.142-156， 2019

## 第 6 章 プレキャストコンクリート型枠内を充填するフレッシュ コンクリートの伝搬加速度の計測および定量化

### 6.1 はじめに

近年の建設業界における就労者数の減少および高齢化<sup>1)</sup>という社会的背景に直面している。一方、コンクリートの締固め作業に着目した場合は、定量的ではなく定性的な作業標準<sup>2)</sup>となっていること、フレッシュコンクリートの伝搬加速度の測定手法は、直接的ではなく間接的な計測<sup>3)</sup>となっていることがほとんどであることなど種々の課題が存在する。本研究では、フレッシュコンクリートに伝搬される加速度の計測システムを開発し、実験室レベルにおける模擬型枠にて内部振動機で締固められるフレッシュコンクリートの計測を行うこととした。それらの研究を基に、外部振動機にてプレキャストコンクリート型枠内を充填するフレッシュコンクリートの伝搬加速度の計測を実施し、より現実的かつ発展した計測手法および定量化を行うこととした。

### 6.2 静電容量式加速度センサ付き無線 IC タグを用いた計測装置

第 4 章および第 5 章で開発した無線加速度計測システムを応用し、かつ 3 軸加速度センサ、磁気センサを搭載したワイヤレスの静電容量式加速度センサ付き無線 IC タグ（以下、無線 IC タグと、略記）をノート PC に接続した受信機にてデータ受信するという完全無線化の計測システムを新たに試作し、試験を実施することとした。

#### 6.2.1 使用した無線 IC タグ<sup>4)</sup>

加速度の測定において、**図 6.1** に示す無線 IC タグと**図 6.2** に示す受信機および USB ポートを用い、受信機をノート PC の USB ボードに接続し、コマンド入力およびデータ送受信等を行い、加速度の計測を行った。

センサタグおよび受信機は、ワイヤレスの加速度、磁気センサタグ、アンテナ、コイン電池ホルダと受信機がセットとなったものを用いた。また、今回使用した無線 IC タグは、数千円/個と従来の有線加速度計より、非常に安価であり、多点計測に適したセンサである。**図 6.3** に接続状況を示す。

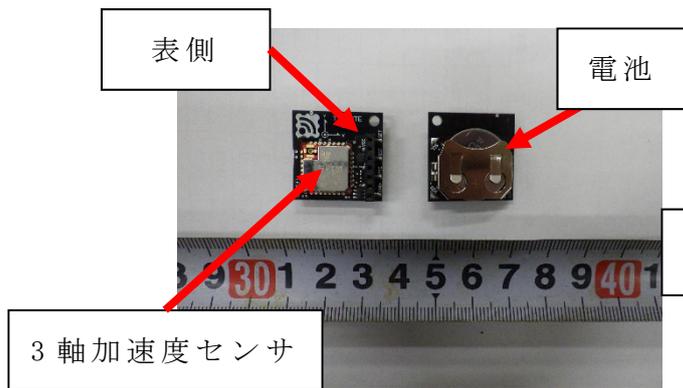


図 6.1 無線 IC タグ

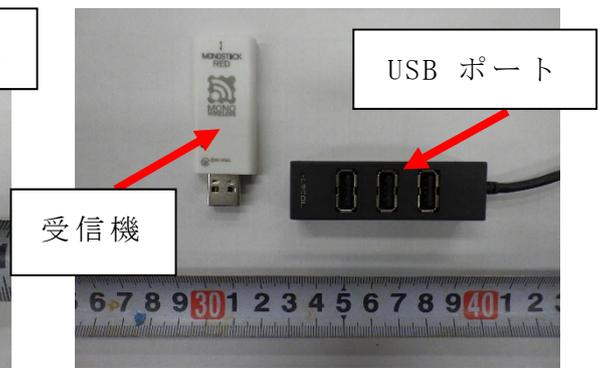


図 6.2 受信機および USB ポート

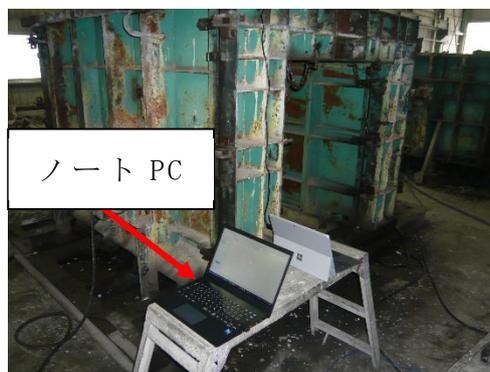


図 6.3 ノート PC への接続状況

## 6.2.2 無線 IC タグの設定方法

### (1) ソフトの準備

使用するノート PC の OS に適合するソフトをインストールする。

### (2) 無線 IC タグの設定

受信機を USB ポートに接続し、設定書き込み用に変換させる。チャンネル番号、送信間隔、センサの計測周波数等の設定を行い、使用する無線 IC タグに書き込みを行う。その後、設定書き込み用に変換させた受信機を受信機用に戻す。

### (3) 計測用プログラム環境の準備

計測用のプログラムを作動させるための環境を整える必要があり、インタープリタ型の高水準汎用プログラミング環境を構築させ、ターミナルソフトをインストールし、プログラミング言語のインストールを実施する。

送信された各種センサ情報等のシリアルデータを受け取るためのスクリプトを

インストールする。

得られるデータは、CSV ファイルとして保存され、容易にデータ処理作業が実施可能となる。

### 6.2.3 無線 IC タグの使用に関する事前処理

前述の無線 IC タグの防水処理として、養生テープ等にて全面を覆うなどの防水処理を施し、プレキャストコンクリートの鋼製型枠内に配筋される鉄筋に括り付ける程度の簡易装着とした。これにより、無線 IC タグが固定拘束による影響をほぼ受けない自由な状態であるものと判断する（図 6.4 および 6.5）。

なお、この無線 IC タグはコンクリート中に埋設され、計測終了後に回収しないものとする。

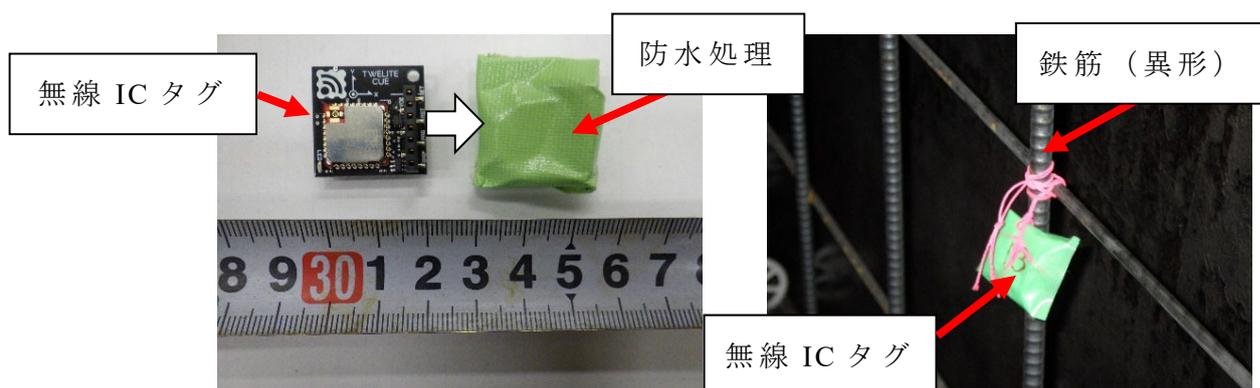


図 6.4 無線 IC タグの防水処理

図 6.5 無線 IC タグの装着状況

以上により、遠隔操作によるフレッシュコンクリートの伝播加速度を完全無線化で計測を行うことが可能となり、同時多点計測を可能にした無線 IC タグを使用した計測手法にて、プレキャストコンクリート工場にて製造されるプレキャストコンクリートを対象に、鋼製型枠内へ打込みされる有スランプおよび締固めを要する高流動のフレッシュコンクリートの締固め過程における伝播加速度を計測した。製造時に外部振動機によって締固めエネルギーが与えられるプレキャストコンクリート製品型枠の形状が伝播加速度に与える影響について検討を行った。

### 6.3 実験詳細および方法

#### 6.3.1 使用した材料およびコンクリートの配合

実験に使用した製品用コンクリートの使用材料および配合表を表 6.1 および表 6.2 に示す。

製品用コンクリート配合は、目標空気量 1.5%，細骨材率 42～43%のコンクリートである。配合設計上における空気量は 1.7%，粗骨材の最大寸法 20mm，設計基準強度は、 $35.0\text{N/mm}^2$ で鉄筋コンクリート製品用の示方配合である。

シリーズ①は、試験用としてスランプの範囲が  $20.0 \pm 1.5\text{cm}$  の有スランプコンクリート、シリーズ②はスランプフロー範囲が  $575 \pm 75\text{mm}$  の締固めを要する高流動コンクリートであり、混和材にフライアッシュⅡ種を混入した粉体系高流動コンクリート配合である。また、いずれの配合においても細骨材の粒度調整用に高炉スラグ細骨材を用いている。

表 6.1 使用材料詳細

種類および材料名			産地、品質等
シリーズ①	セメント	普通ポルトランドセメント	密度 $3.16\text{g/cm}^3$
	細骨材	砕砂	徳島県阿波市産、硬質砂岩、密度 $2.57\text{g/cm}^3$
		高炉スラグ細骨材	広島県福山市産、密度 $2.77\text{g/cm}^3$
	粗骨材	砕石2005	徳島県阿波市産、硬質砂岩、密度 $2.58\text{g/cm}^3$
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	
シリーズ②	セメント	普通ポルトランドセメント	密度 $3.16\text{g/cm}^3$
	混和材	フライアッシュⅡ種	徳島県阿南市産、密度 $2.25\text{g/cm}^3$
	細骨材	砕砂	徳島県阿波市産、硬質砂岩、密度 $2.57\text{g/cm}^3$
		高炉スラグ細骨材	兵庫県神戸市産、密度 $2.72\text{g/cm}^3$
	粗骨材	砕石2010	香川県坂出市産、安山岩、密度 $2.64\text{g/cm}^3$
		砕石1505	香川県満濃町産、閃緑岩、密度 $2.61\text{g/cm}^3$
混和剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物	

表 6.2 使用したコンクリートの配合

種類	粗骨材の 最大寸法 Gmax (mm)	スランブ および スランブフロー の範囲	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
					水 W	結合材 B		骨材		混和剤 A
						セメント C	混和材 FA	細骨材 S	粗骨材 G	
シリーズ①	20	20±1.5cm	41.5	43	174	420	—	743	989	3.36
シリーズ②	20	575±75mm	34.3	42.4	175	350	160	698	940	3.88

### 6.3.2 実験に使用したプレキャストコンクリート

実際の鉄筋コンクリート製品を対象とし、製品選定を行った。選定の際の留意事項として、コンクリートの締固めに言って程度の時間を要する必要があるため、製品重量が1トン以上とある程度のコンクリート容積があること、締固め充填高さがあるもの、汎用性のあるプレキャストコンクリートであることとし、選定を行った。なお、使用した製品の種類および詳細を下記に記す。

選定製品は、製造工場により配合および製造製品群が異なっている。シリーズ①配合では、内幅 1,200×内高 1,200×長さ 2,000mm の農業用水路製品である U 型水路である。シリーズ②配合では、控幅 1,000×壁面高さ 1,250×長さ 2,000mm の道路擁壁や造成工事で使用される道路用 L 型擁壁、内幅 1,500×内高 1,500×長さ 2,000mm の公共下水道や排水路や地下道などで使用されるボックスカルバートとした。選定したプレキャストコンクリートの製品詳細を表 6.3 に、各製品の実物および施工状況等を図 6.6～6.8 に示す。なお、U 型水路の型枠は、製品脱型の関係上、逆さまに組立て、底版が打込み面となる。

表 6.3 選定したプレキャストコンクリート製品詳細

配合	製品名称	規格寸法 幅×高×長 (mm)	主鉄筋	参考質量 (kg)
シリーズ①	U型水路	1,200×1,200×2,000	D10	2,370
シリーズ②	L型擁壁	1,000×1,250×2,000	D10	1,290
	ボックス カルバート	1,500×1,500×2,000	D16	5,170



図 6.6 U型水路（製造時逆さまで打設，反転し，施工状況）



図 6.7 道路用 L型擁壁（製品，施工状況）



図 6.8 ボックスカルバート（製品，施工状況）

### 6.3.3 無線 IC タグの取付け箇所および外部振動機について

3 種類のプレキャストコンクリートに配筋される鉄筋に無線 IC タグを取付け（図 6.5），測定準備とする。取付け位置詳細を図 6.9，図 6.10 および図 6.11 に示す。

シリーズ①配合における U 型水路では，実験 1 回目（【1】と標記）と 2 回目（【2】と標記）に分けて 2 体の製品製造を行った。外部振動機近傍およびその振動効果が得られにくいと推定される打込み面の底版付近や側壁の端部位置など合計 11 箇所設置した。2 体の製品製造を実施時において，実験 1 回目打設時に【1】1～6 までの箇所，左側側壁部が【1】1～4，底版部（打設時は上面）が

【1】5, 6 の 2 箇所の測定を行った。実験 2 回目目打設時に【2】1~5 までの箇所、左側側壁部が【2】1, 右側側壁部が【2】2, 底版部（打設時は上面）が【2】3~5 の 3 箇所を測定した。

シリーズ②配合における L 型擁壁では、U 型水路同様、打設は底版部から行う製品で、外部振動機近傍と遠距離にある位置など合計 8 箇所設置した。同じく 2 体の製品製造を行い、実験 1 回目打設時に左側側壁部【1】1~2, 実験 2 回目打設時に左側および右側側壁部、底版部の【2】1~6 を測定した。

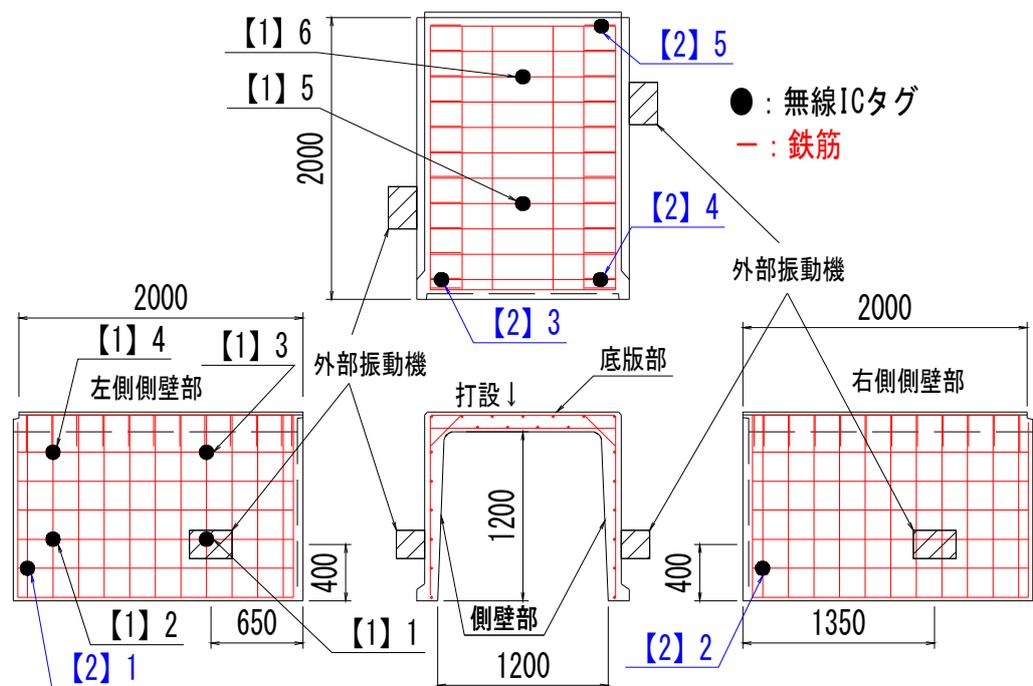


図 6.9 U 型水路（無線 IC タグ：【1】1~6, 【2】1~5）

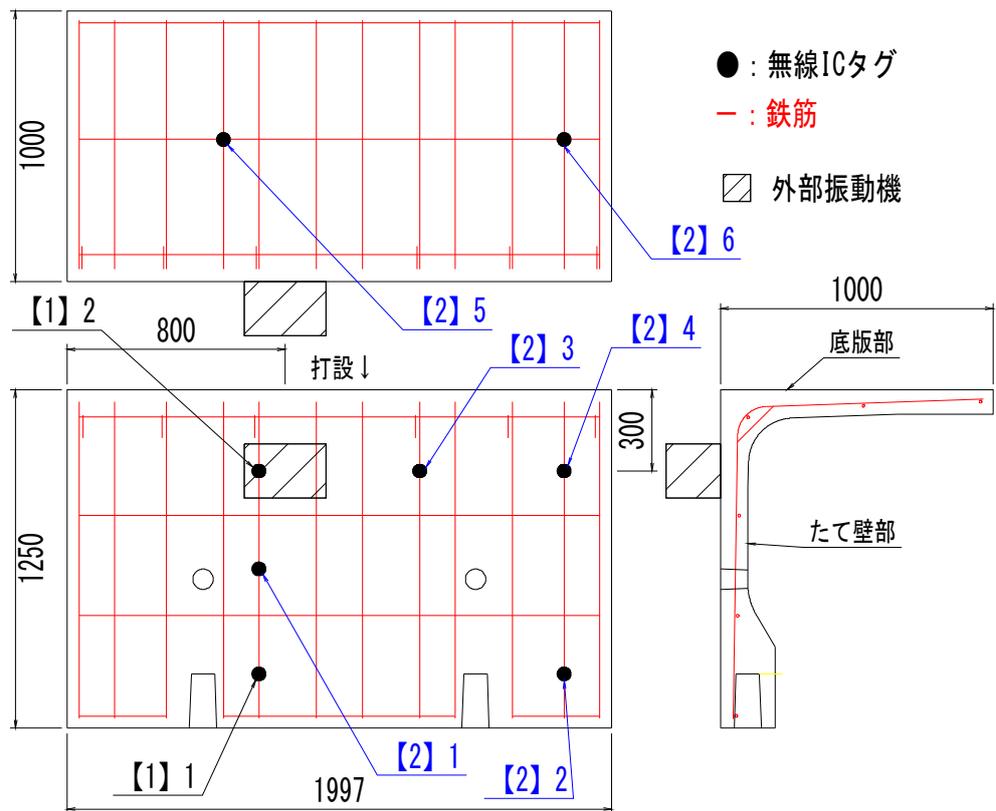


図 6.10 L型擁壁（無線 IC タグ：【1】 1～2，【2】 1～6）

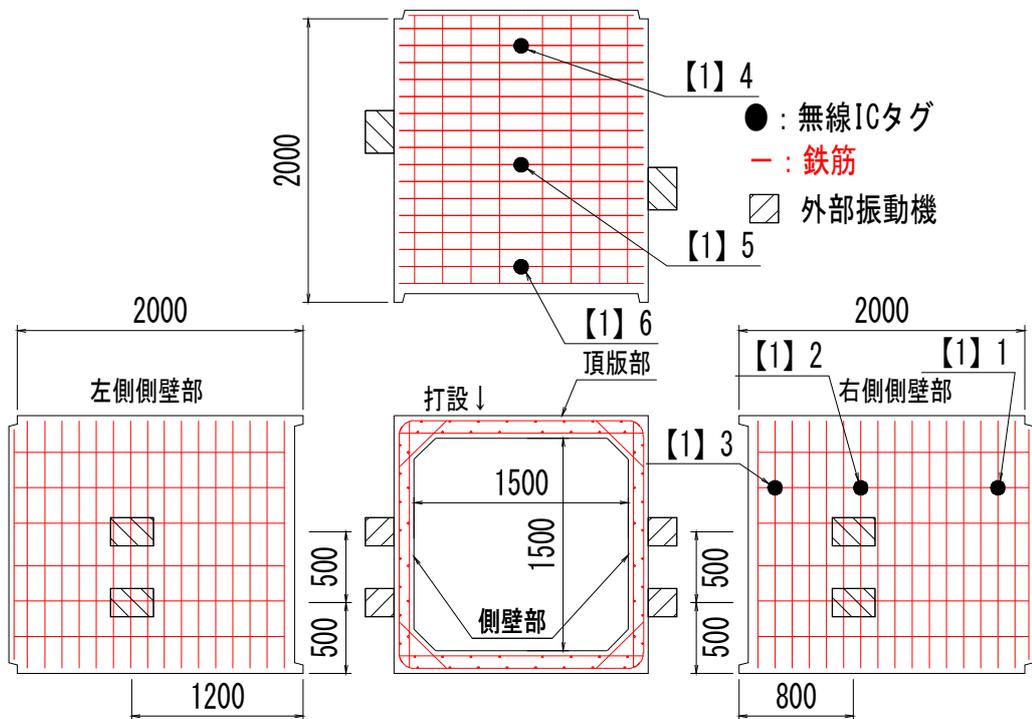


図 6.11 ボックスカルバート（無線 IC タグ：【1】 1～6）

同じくシリーズ②の締固めを要する高流動配合を使用するボックスカルバートでは、【1】1～6までの合計6箇所とした。

なお、プレキャスト型枠に装着されている高周波の外部振動機の規格を表6.4に示す。

表 6.4 外部振動機の規格

型式	出力	電圧	電流	周波数	振動数	最大遠心力
HKM75LA	750W	48V	17.0A	100～240Hz	50～120Hz	11.6kN

#### 6.3.4 無線 IC タグの計測方法

打設されるフレッシュコンクリートの加速度を計測した方法を下記に記す。

##### (1) 製品製造準備

設定された無線 IC タグに防水処理を行い、各製造製品の設置位置に取付け、鉄筋を鋼製型枠内に挿入し、型枠を閉合するなど打設前準備を行う。

##### (2) 加速度計測準備

起動させたノート PC に受信機を必要数、USB ポートに接続する。

##### (3) 計測環境準備

計測用プログラムを起動し、計測前環境を整える。

##### (4) 受信機の配置

受信機を受信しやすい位置、型枠天端付近に静置。

##### (5) 計測開始

コンクリート打設および外部振動機始動を開始、充填締固めされるフレッシュコンクリートの加速度を受信する。

##### (6) 計測完了

コンクリート打設および打設完了にて、計測完了。

#### 6.3.5 計測データの整理

計測するデータのサンプリング間隔は 100Hz とし、得られた x, y, z 軸方向の加速度 (accX, accY, accZ) を式 (6.1) (式 (4.1) 同様) に記載する計算式にて合成加速度を演算、処理した。

$$\text{合成加速度} = \sqrt{\text{acc}X^2 + \text{acc}Y^2 + \text{acc}Z^2} - g \quad (6.1)$$

ここに  $\text{acc}x$  : x 軸方向の加速度 (m/s<sup>2</sup>)

$\text{acc}y$  : y 軸方向の加速度 (m/s<sup>2</sup>)

$\text{acc}z$  : z 軸方向の加速度 (m/s<sup>2</sup>)

$g$  : 標準重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)

## 6.4 実験結果および考察

### 6.4.1 各配合シリーズにおけるフレッシュコンクリートの性状

各配合シリーズで使用したコンクリートのフレッシュ性状を表 6.5 に示す。シリーズ①は、目標スランプ (20.0cm) の範囲内であった。シリーズ②の L 型擁壁製造時は、締固めを要する高流動コンクリート性状とし、ボックスカルバート時は、スランプフローが 360mm と経時変化で小さくなったコンクリートを使用することとした。

表 6.5 各配合シリーズのフレッシュコンクリートの性状

配合	製品名称	スランプ(sl.)および スランプフロー (flow)		空気量
シリーズ①	U型水路	1回目	sl. 19.0cm	1.0%
		2回目	sl. 20.0cm	1.2%
シリーズ②	L型擁壁	1回目	frow 560mm	1.3%
		2回目	frow 510mm	1.4%
	ボックスカルバート	flow 360mm		1.3%

### 6.4.2 配合 : シリーズ①【製品 : U 型水路】

無線 IC タグを取付け、コンクリートの打設状況を図 6.12, 1 回目打設時の経過時間と合成加速度との関係を図 6.13 に示す。また、合成加速度の変動振幅が大きいことから、前後 5 点による移動平均を図示することとした (【1】1 のみ実測値を記載)。なお、本 U 型水路は、上下が反転した鋼製型枠となっており、コンクリートの投入は、底版部から打設され、両方の側壁部、その後最終底版部といった順序で打設される。コンクリートの打設はリフト投入機を用いて実施した。打設されたコンクリートの時系列挙動を下記に示す。

( 1 ) 底版部の打設

振動開始約 10 秒後，底版部少量打設を実施した（製造工程上の都合）。

( 2 ) 側壁部の打設

約 40 秒後，左側側壁部を打設，80 秒後，右側側壁部の打設を行った。

( 3 ) 左右側壁部の打設・充填締め

約 120 秒後，左側充填，280～320 秒後に左右充填を行った。

( 4 ) 打設および締め完了

430 秒および 540 秒付近，底版部充填し，打設および締めを完了した。



図 6.12 無線 IC タグの取付けおよびコンクリートの打設状況（U 型水路）

計測箇所の実質充填締めされている経過時間時の合成加速度は，側壁部【1】1-2 は， $50\sim 80\text{m/s}^2$  まで上昇している。その後，120 秒後に合成加速度が途絶えた。側壁上部の【1】3-4 は， $110\sim 125\text{m/s}^2$  まで上昇し，320 秒後，合成加速度が減少傾向を示しつつ，途絶えた。一方，底版部【1】5 は，540 秒後に  $25\text{m/s}^2$ ，【1】6 は約  $50\text{m/s}^2$  の合成加速度が計測され，製品の打設および締めが完了した。【1】1～4 において，データ受信が途絶えた理由としては，コンクリートが側壁部に投入されたことによるかぶりコンクリートが一定のボリューム(厚さ)を有すると無線通信が不通となる可能性があり，鋼製型枠の鋼板厚さが大きい場合も同様と思われる。側壁部は短時間で底版付近まで打設されが，【1】4 の移動平均データの減少傾向から振動締めが行われ，一定程度の締めが進行および収束しつつあることを意味している。底版部では，投入時の突発的な上昇を除き，概ね  $25\text{m/s}^2$  以下の合成加速度で推移しており，ほぼ投入時直後から厚み 140mm の底版部コンクリートの振動締めが 30 秒程度の短時間で十分であったものと考えられる。

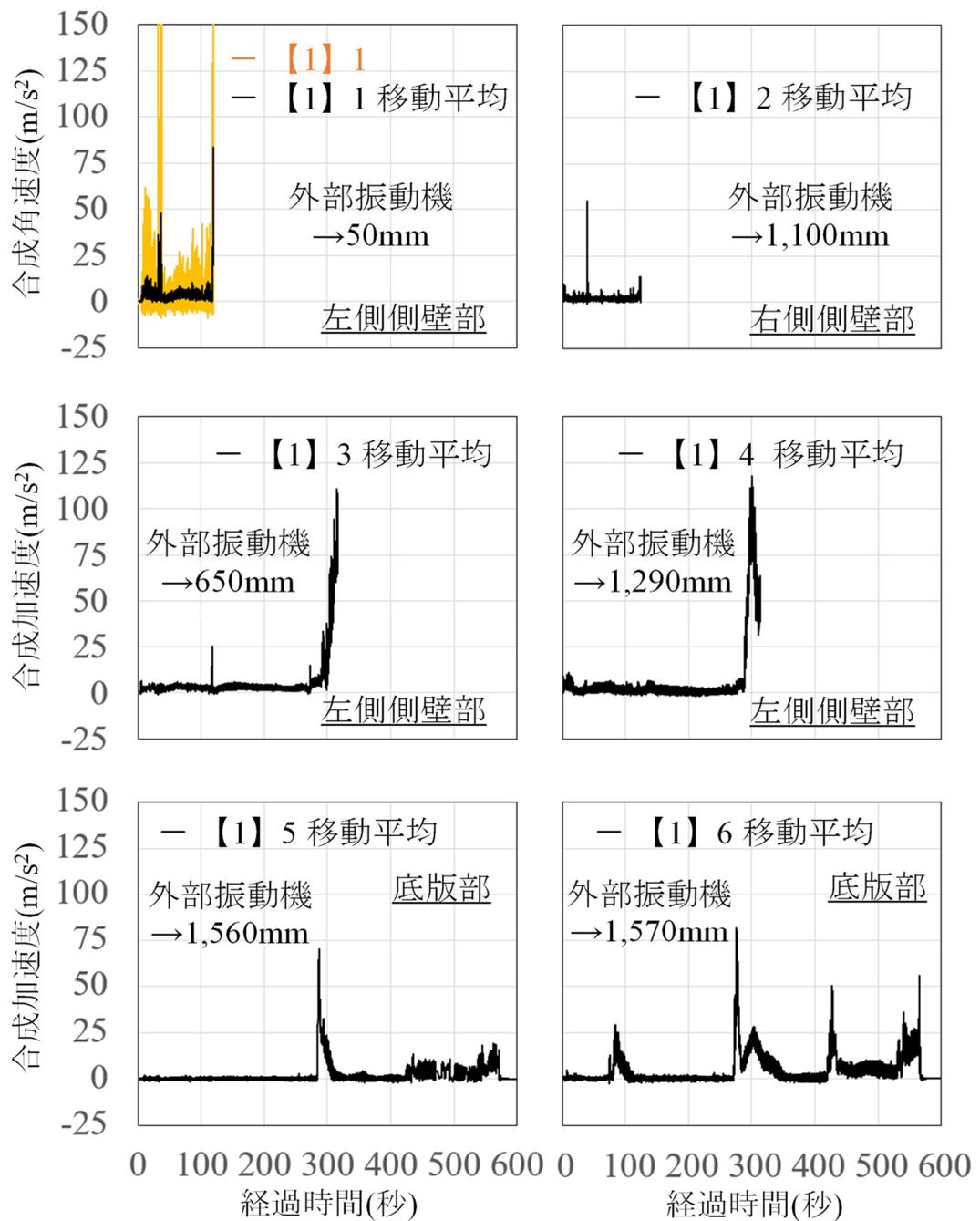


図 6.13 経過時間と合成加速度との関係 (U型水路 : 1 回目)

次に別日の 2 回目打設時の経過時間と合成加速度との関係を図 6.14(図 6.12 同様, 【2】 1 のみ実測値を記載表記)。に示すとともに, 時系列挙動を下記に記載する。

(1) 底板部および側壁部の打設

30 秒後, 底板部, 左側壁部打設を開始した。

(2) 側壁部および底版部全体の打設

50 秒後，右側側壁部へ一定量打設し，その後全体に打設を行った。

(3) 底版部全体の打設・充填締め，完了

460 秒後，底版部全体を打設し，充填させ，750 秒後締め完了とした。

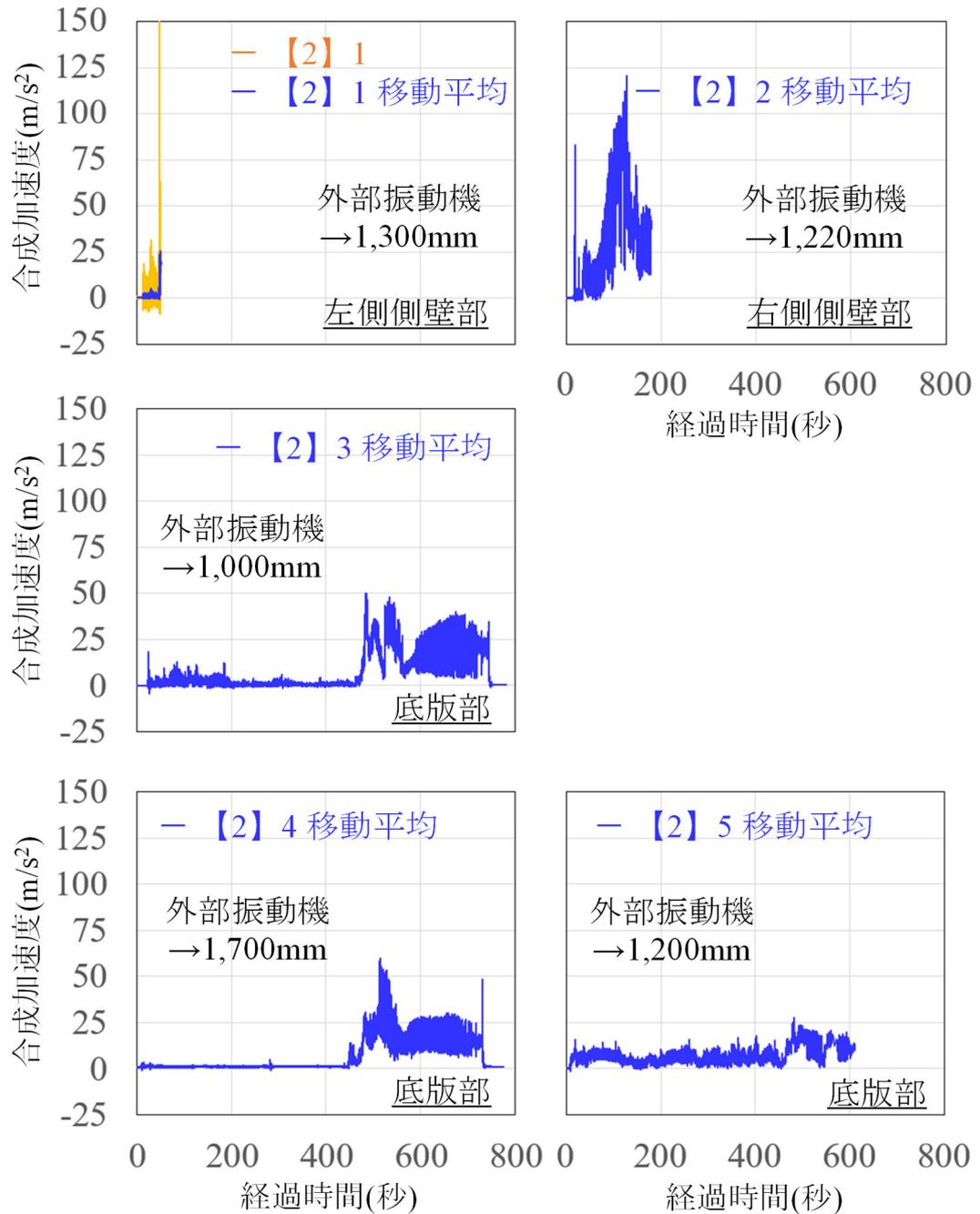


図 6.14 経過時間と合成加速度との関係 (U型水路 : 2 回目)

側壁部下側【2】2の充填締固め中の合成加速度は、 $100\sim 125\text{m/s}^2$ をピークに減少傾向を示した。【2】1については、左側側壁打設時に合成加速度を瞬間計測し、不通となった。底版部【2】3～5では、実質充填締固め中の合成加速度ピークは $25\sim 50\text{m/s}^2$ であり、その後の減少および収束傾向を示している。1回目同様、底版部は側壁部より合成加速度も小さく、締固めが概ね完了しているものと推測する。

1および2回目を通じて、プレキャストコンクリートの鋼製型枠に打設されるフレッシュコンクリートの伝播加速度を計測できているものと思われる。また、打設時系列に差異はあるが、打設落下および外部振動機に近い側壁部の合成加速度は大きい。また、水平移動を伴う箇所の合成加速度は、打設コンクリート量などにより差異は生じるが、全体的に $50\text{m/s}^2$ 程度と小さい合成加速度の値を示した。

#### 6.4.3 配合：シリーズ②【製品：L型擁壁】

使用型枠、無線ICタグセンサー取付け、コンクリートの打設状況を図6.15、1回目打設時の経過時間と合成加速度との関係を図6.16に示す。L型擁壁についても上下が反転した鋼製型枠、かつ2個/型となっている。コンクリートの投入は、U型水路同様、底版部方向から打設され、たて壁部へ打設される。



図 6.15 無線 IC タグの取付けおよびコンクリートの打設状況 (L 型擁壁)

コンクリート打設および充填締固め時の時系列挙動を下記に記載する。

##### (1) 底版部およびたて壁部の打設

開始 20 秒後、底版部、たて壁部の打設を開始した。

##### (2) たて壁部全体の打設および充填締固め

50～180 秒、たて壁部の打設がほぼ完了し、振動締めを一時停止した

(3) たて壁部および底版部全体の打設・充填締め、完了

290 秒後、外部振動機を再振動させ、たて壁部・底版部全体打設を完了した。

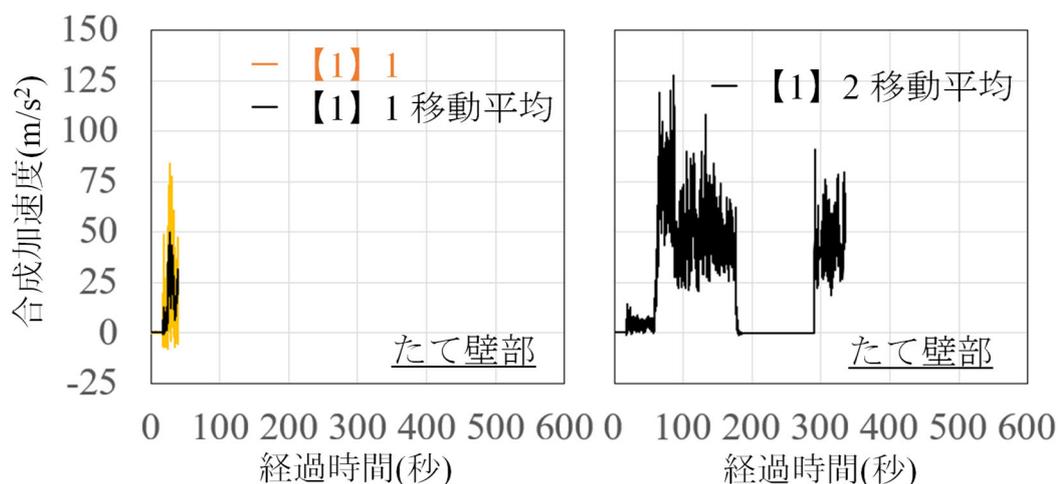


図 6.16 経過時間と合成加速度との関係 (L型擁壁：1回目)

たて壁部下部位置の実測値および移動平均の合成加速度【1】1は、コンクリート投入時の影響で受信不良となった。たて壁上部の【1】2は、 $125\text{m/s}^2$ の合成加速度計測し、その後減少に転じ、時系列挙動との関係から締固めの収束傾向を示しているものと思われる。再振動後の底版部・たて壁部打設時も同程度の数値を計測したが、340秒後のデータも測定不良と思われる。

次に別日の2回目打設時の経過時間と合成加速度との関係を図 6.17 に示す。練混ぜ後、経時変化で流動性を低下させ、打設を行った。

打設時の時系列挙動を下記に記載する。

(1) 底版部およびたて壁部の打設

開始 30 秒後と 130 秒後に底版部およびたて壁部の打設を行い、一時休止。

(2) 底版部およびたて壁部の上段まで打設

330 秒後、底版部およびたて壁部の上段付近まで打設および締固めの実施。

(3) 全ての部位の打設、充填締め

約 500～630 秒で残りをすべての部位の打設・締固めを行い、製造を完了した。

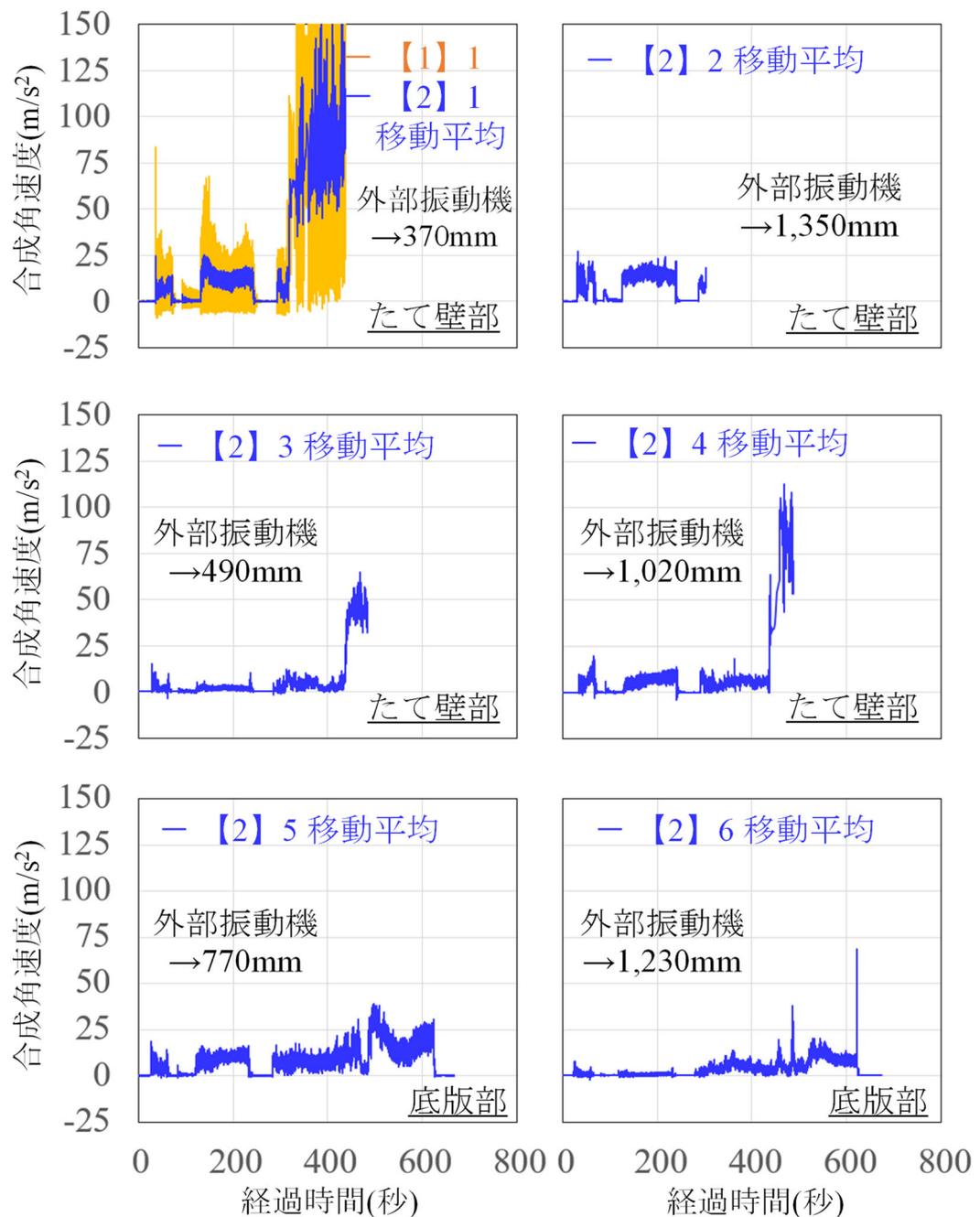


図 6.17 経過時間と合成加速度との関係（L型擁壁：2回目）

たて壁下部【2】1の合成加速度は $125\sim 150\text{m/s}^2$ 、外部振動機近傍の上部【2】3は $50\sim 65\text{m/s}^2$ 、上端部の【2】4は $100\sim 110\text{m/s}^2$ を計測した。底板部の【2】5-6は、概ね $25\sim 30\text{m/s}^2$ と小さい値を示した。またいずれの合成加速度ともピークがあり、その後減少に転じ、前述のU型水路と同様の傾向となっている。

1および2回目の合成加速度およびその移動平均傾向より、無線ICタグによ

るフレッシュコンクリートの伝播加速度の測定は可能であると判断できる。たて壁の外部振動機近傍の箇所の合成加速度は高い数値となり，底版部の約100mmの厚みコンクリート箇所は外部振動機位置から遠く，合成加速度は $30\text{m/s}^2$ 以下と非常に小さい。

#### 6.4.4 配合：シリーズ②【製品：ボックスカルバート】

実験状況を図 6.18，打設時の経過時間と合成加速度との関係を図 6.19 に示す。製造において，コンクリートは4バッチに分けて徐々に打設を行った。

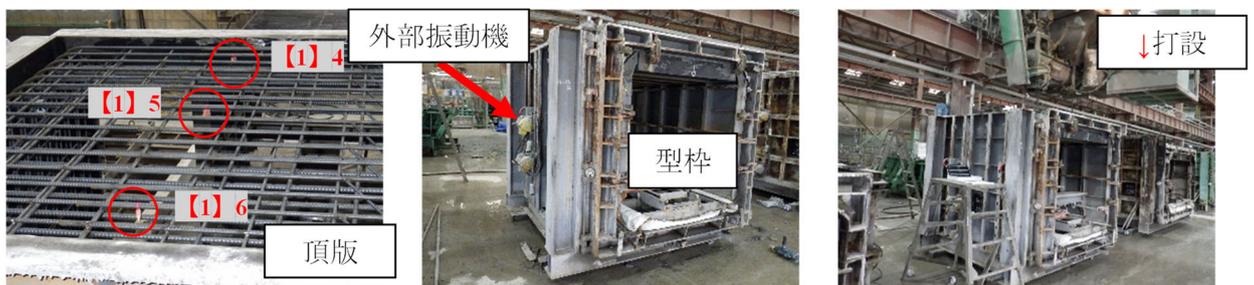


図 6.18 無線 IC タグの取付け，型枠およびコンクリートの打設状況  
(ボックスカルバート)

側壁部での測定位置【1】1～3では，1,850秒後に多くのかぶりコンクリートが側壁部に打設され，通信遮断となり，受信不能となった。ボックスカルバートの型枠へのコンクリートの打込みは，通常の型枠内に充填されるコンクリートの打込みと比較して，打込みの時間が短い。特に，鉛直方向の狭隘な空間に大量のコンクリートが打ち込まれる。そのため，通信が瞬時に不通になったと思われる。また，本研究に使用した無線 IC タグの通信には限界があると考えられ，かぶりが25～30cmを超えると通信不能になる場合がある。そのため，瞬時に通信遮断が起こってしまったと考えられる。ただし，それ以前に測定された合成角速度については，受信できていることより，有効な値であると判断した。厚み160mmの頂版部【1】4～6においては，最終打設時の2,800秒付近から $25\sim 50\text{m/s}^2$ の合成加速度を計測し，その後収束した。締固め完了まで計測できたデータの範囲内では，外部振動機から遠い位置にある打設天端の箇所は小さい合成加速度となった。

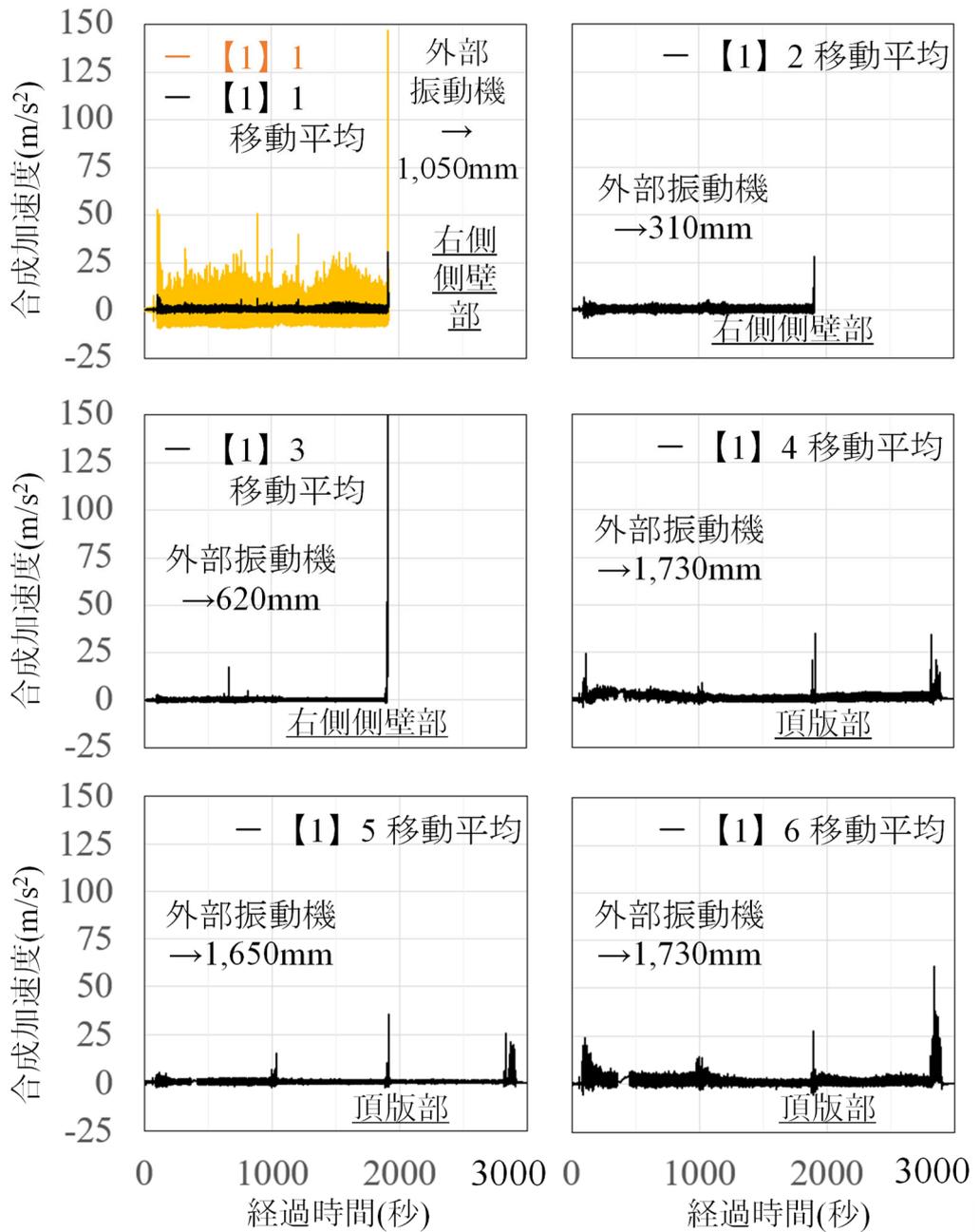


図 6.19 経過時間と合成加速度との関係 (ボックスカルバート)

#### 6.4.5 フレッシュコンクリートの性状および無線 IC タグ位置と合成加速度との関係

シリーズ①および②におけるフレッシュ性状，無線 IC タグ位置（外部振動機からの距離）および振動時間内の最大合成加速度を表 6.6 に示す。また，各シリーズによる外部振動機からの距離と最大合成加速度との関係を図 6.20，鉛直や水平部材に取付けた無線 IC タグ位置による最大合成加速度の分布状況を図 6.21，各種プレキャスト製品で測定された最大合成加速度の分布状況を図 6.22 に示す。なお，図 6.20，図 6.21 および図 6.22 の最大合成加速度の測定点は同一であり，図 6.22 は，U 型水路，L 型擁壁およびボックスカルバートの最大合成加速度の時系列データを近似曲線で示したものである。

有スランプコンクリートで製造した U 型水路，締固めを要する高流動コンクリートで製造した L 型擁壁およびボックスカルバートの振動時間内の最大合成加速度は，外部振動機から近い位置では概ね高く，遠い位置にある箇所では小さい傾向を示している。本傾向より，スランプおよびスランプフローの大きさが振動時間内の最大合成加速度に影響していないものと推察する。

また，本試験に用いた製品群における無線 IC タグ位置と振動時間内の最大合成加速度との関係は，製品種類に関係なく，無線 IC タグの測定位置が鉛直部材の場合は大きな値のものが高く，水平部材はすべて小さい結果となった。全般としては，最大合成加速度が  $100\text{m/s}^2$  を境界とした 2 局化した分布となっているものの，外部振動機の加振位置に近い箇所は，高い合成加速度を示し，遠い位置にある箇所では，低い傾向となった。

表 6.6 各配合シリーズにおけるフレッシュコンクリートの性状，  
無線 IC タグ位置および振動時間内の最大合成加速度

プレキャスト コンクリート 製品	測定点	スランブ および スランブフロー	無線ICタグの 測定位置 (打設上の製品部材)	無線ICタグ位置 (外部振動機からの距離) (mm)	振動時間内の 最大合成加速度 (m/s <sup>2</sup> )
シリーズ ① U型水路	【1】	19.0cm	鉛直部材	50	80
				1,110	—
				650	110
			水平部材	1,290	125
				1,560	25
				1,570	50
	【2】	20.0cm	鉛直部材	1,300	—
				1,220	125
			水平部材	1,000	50
				1,700	50
1,200				25	
シリーズ ② L型擁壁	【1】	560mm	鉛直部材	750	50
				100	125
	【2】	510mm	鉛直部材	370	150
				1,350	20
				490	65
				1,020	110
			水平部材	770	30
				1,230	20
	【1】	360mm	鉛直部材	1,050	30
				310	30
620				150	
水平部材			1,730	25	
			1,650	20	
			1,730	50	

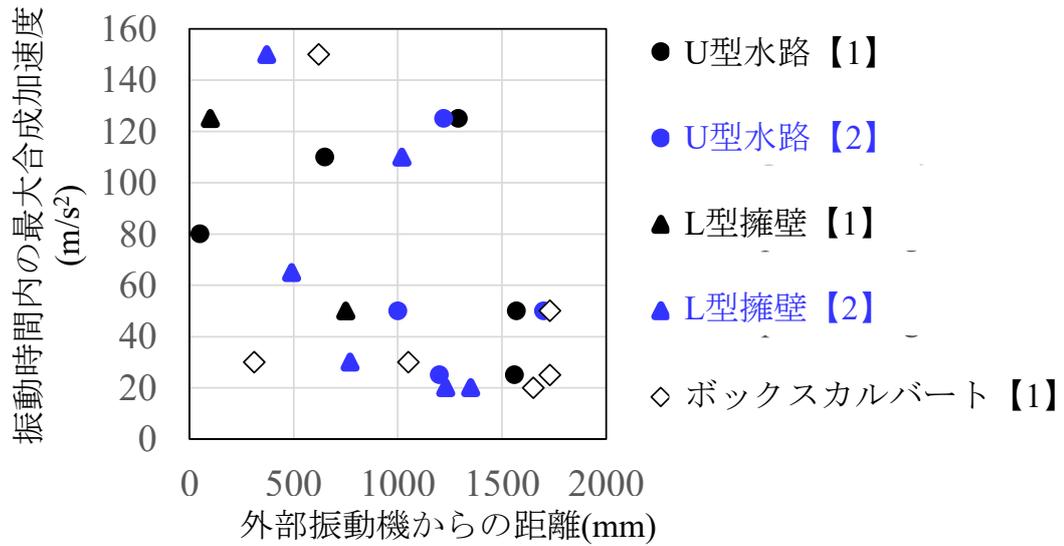


図 6.20 各シリーズによる外部振動機からの距離と最大合成加速度との関係

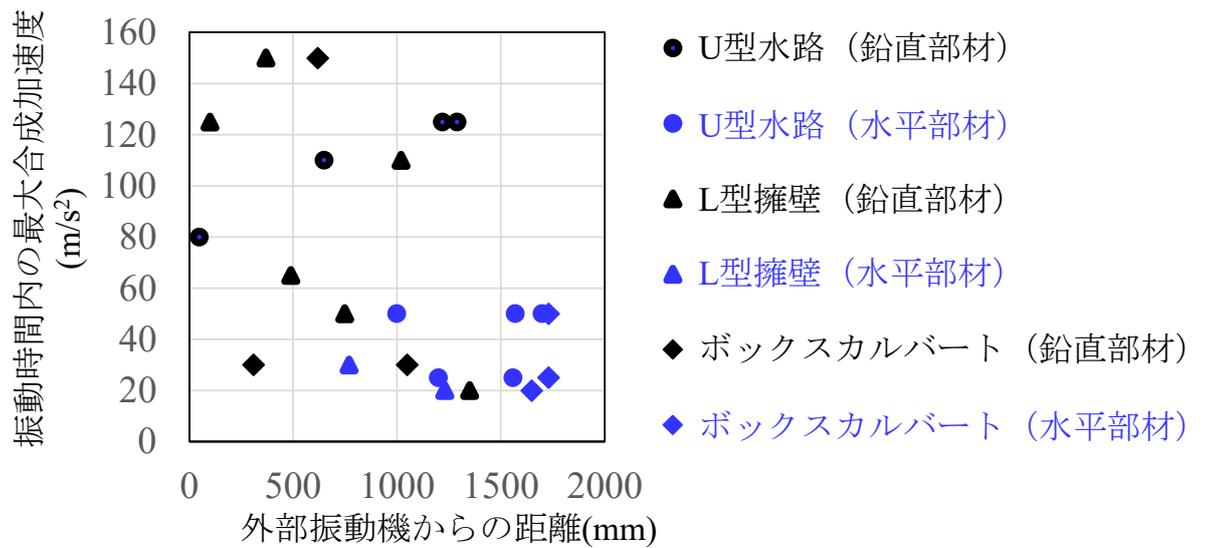


図 6.21 各シリーズによる鉛直や水平部材に取付けた無線 IC タグ位置による最大合成加速度の分布状況

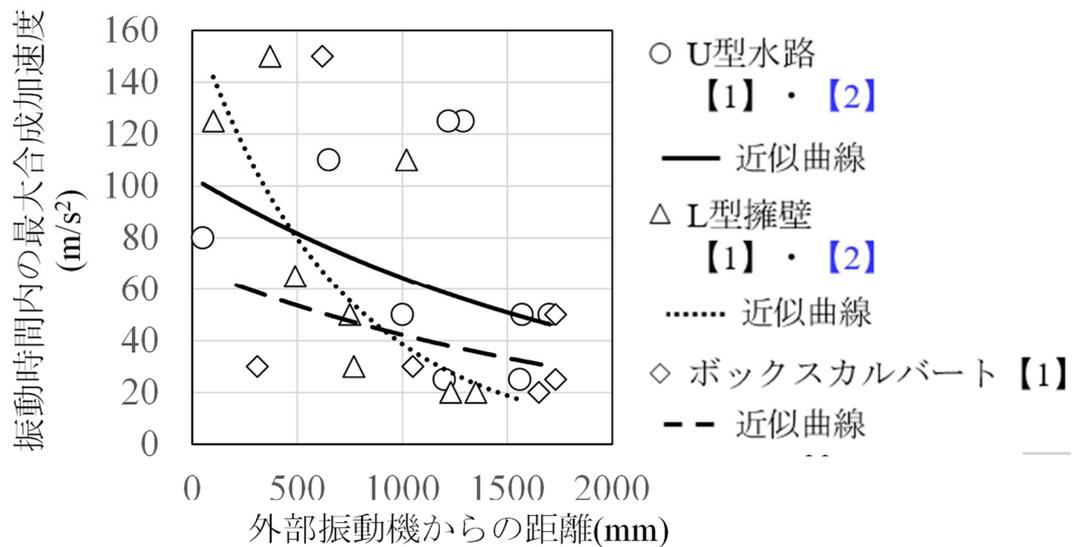


図 6.22 各種プレキャストコンクリート製品で測定された最大合成加速度の分布状況

以上より、振動時間内の最大合成加速度は、外部振動機の近傍と遠方の位置で異なる伝播加速度となる。これは、加振位置からの距離による減衰作用に起因するものと考えられる。

今回初めて、無線 IC タグを用いて、型枠に充填されるフレッシュコンクリートの伝播加速度を計測することができた。また、これまで経験則に基づいたプレキャストコンクリート型枠の部材設計や外部振動機の設置位置等をより合理的に設計および配置するための基礎資料に役立つ実験データを得ることができたものとする。

## 6.5 本章のまとめ

同時多点計測を可能にした無線 IC タグを使用した完全無線化の加速度計測手法にて、プレキャストコンクリート工場で製造される製品を対象に、型枠内へ打設される有スランプおよび締固めを要する高流動のフレッシュコンクリートの伝播加速度を計測した。外部振動機によって締固めエネルギーが付与されるプレキャストコンクリート製品において、フレッシュコンクリートの締固め伝播加速度が与える影響について実験的検討を行った。

本実験の範囲内で得られた知見を下記に記す。

- (1) プレキャストコンクリートの型枠内に充填されるフレッシュコンクリートの伝播加速度を静電容量式加速度センサ付きの無線 IC タグにて計測することができた。
- (2) スランプやスランプフローが大きく変わっても、同一部位で計測した加速度の大きさは同程度である。
- (3) 無線 IC タグによるフレッシュコンクリート内の伝播加速度は、外部振動機近傍では、大きな値(100~150m/s<sup>2</sup>程度)となり、遠方では、小さい値(50m/s<sup>2</sup>以下)となり、加振位置からの減衰作用と考えられる。

今回、静電容量式加速度センサ付きの無線 IC タグを用いた完全無線化のフレッシュコンクリートの伝播加速度を計測するシステムを構築することができ、加速度センサの固定方法についても流動するコンクリートの影響を概ね除外できたものと判断する。また、プレキャストコンクリート型枠内に充填するフレッシュコンクリートの伝播加速度についても直接的確認することができ、これまで経験則に基づいていたプレキャストコンクリート型枠の部材設計や外部振動機の設置位置等をより合理的に設計および配置するための基礎資料になり得る実験結果であったと考える。外部振動機近傍での受信が不通になる現象に関しては、**第 7 章**において詳細に実験的検討を行うこととした。

具体的には、この無線 IC タグと、**第 4 章**および**第 5 章**で提案したシングルボードコンピューターおよび静電容量式の加速度センサを用いた一部有線による計測方法との併用が考えられる。鉛直方向で急激にかぶりが 25~30cm を超えるような打込み箇所の加速度を計測する部位では、無線 IC タグではなく有線による計測手法を用いる方が適当であると現時点では一考の価値があるものと推察する。

## 第6章の参考文献

- 1) 国土交通省：最近の建設業を巡る状況について，持続可能な建設業に向けた環境整備検討委員会，第1回検討会，参考資料1，2022
- 2) 公益社団法人土木学会：コンクリート標準示方書【施工編】，2017
- 3) 山内匡，野口貴文，山本秀之，友寄篤：加速度センサによるコンクリート振動締固め状況の把握，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.1337-1442，2019
- 4) モノワイヤレス株式会社：磁気・加速度センサー無線タグ TWELITE® CUE，<https://mono-wireless.com/jp/products/twelite-cue/index.html>

## 第7章 無線 IC タグのコンクリート媒質への適用範囲および コンクリートの伝搬加速度測定に関する今後の展望

### 7.1 はじめに

近年、無線 IC タグは種々の産業で幅広く注目を集めている現状にある。その用途は様々であり、計測・測定や管理などの業務改善用途に適用が推し進められている。特にバーコードでは実現できない特徴として、①長距離の無線通信でデータの読み取りが可能、②複数のタグを一括読み取りが可能、③一定の障害物の外部からも読み取り可能、④長寿命であるなどを有する。周波数帯についても周波数別に①LF帯（～135KHz）、②HF帯（13.56MHz）、③UHF帯（860～960MHz）、④マイクロ波帯（2.45GHz）と4種類存在している（表7.1）。

表 7.1 各通信帯における無線 IC タグの特長<sup>1)</sup>

通信帯	LF	HF	UHF	マイクロ波
周波数	～135KHz	13.56MHz	860～960MHz	2.45GHz
通信方式	電磁誘導	電磁誘導	電波	電波
通信範囲	～10cm	～10cm	～数m	～3m
金属の影響	中	大きい	大きい	大きい
水の影響	少ない	少ない	中	大きい
主な用途	キーレスエントリー	ICカード	在庫管理	静電容量式加速度センサ付き無線ICタグ

本実験で用いた静電容量式加速度付き無線 IC タグは、属性からして金属の影響や水の影響を受けやすいものに分類される。

第6章にて、静電容量式加速度センサ付き無線 IC タグを用い、プレキャストコンクリート型枠に充填されるフレッシュコンクリートの伝搬加速度を直接的に計測することが概ね可能であることを確認した。しかしながら、一部の条件下において、受信不通状態などの影響が発生した。同時多点による加速度計測の信頼性を向上させるためには、受信不通の条件や限界性能を明確にすることが重要である。

本章では、セメント系材料の各種媒質に無線 IC タグを埋没させ、受信される加速度データの通信状態に着目し、打設されるセメント系材料に対する限界か

ぶり厚さに関する評価試験を実施した。また、それらの各種試験結果を考慮したコンクリートの伝搬加速度測定に関する今後の展望を推察することとした。

## 7.2 無線 IC タグ<sup>2)</sup>

### 7.2.1 無線 IC タグの概要詳細

無線 IC タグは、第 6 章で使用したものと同種類および形状ものを用いた。表 7.2 に無線 IC タグの規格（寸法形状および通信に関する事項）を示す。

表 7.2 無線 IC タグの規格

寸法形状	通信方式	通信速度
□縦25×横25×厚10	2.4GHz IEEE802.15.4	最大 250kbps

寸法形状は、極めて小さく、軽量である。また通信に関する規格も国際標準規格のものとなっている。また、図 7.1 に同様ではあるが、無線 IC タグの詳細を示す。

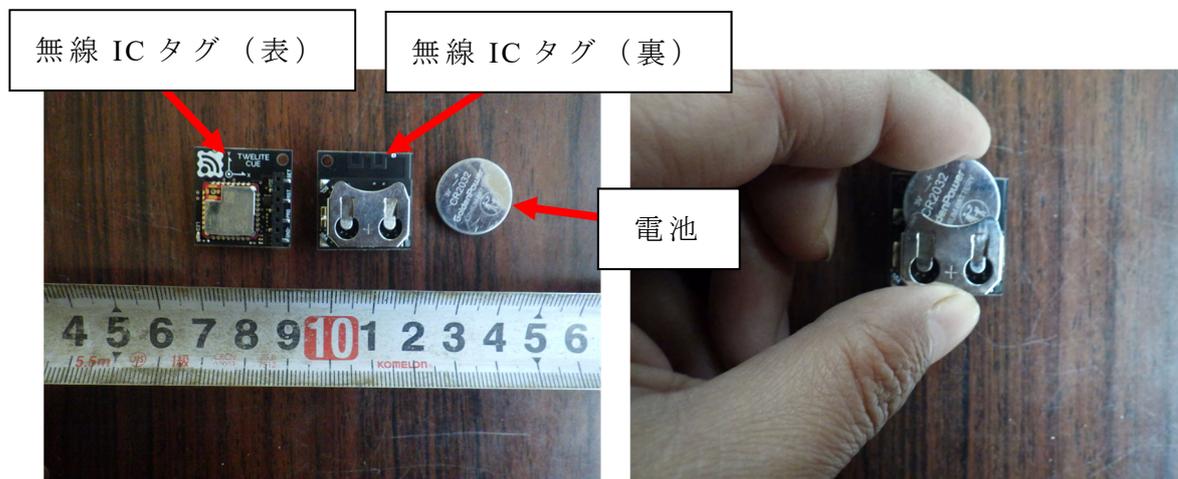


図 7.1 無線 IC タグおよび電池挿入状況

### 7.2.2 無線 IC タグの設定方法

無線 IC タグの設定方法についても、第 6 章、6.2.2 同様に実施し、測定準備を整えた。下記に同様事項を記載する。

#### (1) ソフトの準備

使用するノート PC の OS に適合するソフトをインストールする。

## (2) 無線 IC タグの設定

受信機を USB ポートに接続し，設定書き込み用に変換させる。チャンネル番号，送信間隔，センサの計測周波数等の設定を行い，使用する無線 IC タグに書き込みを行う。その後，設定書き込み用に変換させた受信機を受信機用に戻す。

## (3) 計測用プログラム環境の準備

計測用のプログラムを作動させるための環境を整える必要があり，インタープリタ型の高水準汎用プログラミング環境を構築させ，ターミナルソフトをインストールし，プログラミング言語のインストールを実施する。

送信された各種センサ情報等のシリアルデータを受け取るためのスクリプトをインストールする。

得られるデータは，CSV ファイルとして保存され，容易にデータ処理作業が実施可能となる。

### 7.2.3 無線 IC タグの使用に関する事前処理

無線 IC タグの使用に関する事前処理についても，第 6 章，6.2.3 同様に実施し，測定準備を整えた。下記に同様事項を記載する。前述の無線 IC タグの防水処理として，養生テープ等にて全面を覆うなどの防水処理を十分に施し，各媒質内に埋設された状態でも防水性が損なわれないものとした（図 7.2）。

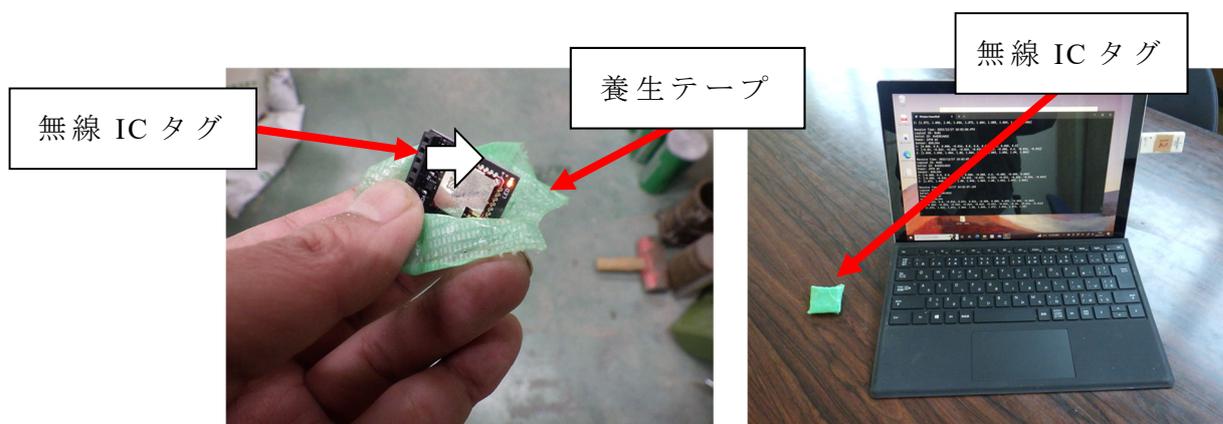


図 7.2 無線 IC タグの防水処理状況

### 7.3 実験詳細および方法

#### 7.3.1 使用した材料および媒質配合

実験に使用した使用材料および配合表を表 7.3 および表 7.4 に示す。

表 7.3 使用材料詳細

種類および材料名			産地, 品質等
シリーズ①	セメント	普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm <sup>3</sup>
	水	上水道水	
	細骨材	砕砂	徳島県阿波市産, 硬質砂岩, 密度2.57g/cm <sup>3</sup>
シリーズ②	セメント	普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm <sup>3</sup>
	水	上水道水	
	粗骨材	砕石2010	徳島県産, 密度2.57g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率7.04
		砕石1505	徳島県産, 密度2.57g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率6.38
	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 7.4 使用した媒質の配合

種類	媒質	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )			
				水 W	骨材		
					結合材 セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
シリーズ①	モルタル	50	100	314	627	1254	0
シリーズ②	グラウト	30	—	488	1625	0	0
		40	—	560	1400	0	0
		50	—	613	1225	0	0
	モルタル	50	100	252	504	1512	0
		70	100	321	458	1374	0
	コンクリート	30	58	114	380	1141	829
		47	47	165	350	823	841
		50	58	178	355	1066	761
70		58	232	322	995	710	

媒質配合として、シリーズ①はモルタル配合とし、まず初期段階としての媒体や媒質の差異による影響を確認するための配合とした。シリーズ②はコンクリート、モルタル、グラウトの3種類の媒質とし、水セメント比および細骨材率を適宜変更させ、媒質の性状差異による影響を把握できるような配合設計と

した。なお、使用した材料は汎用材料である。

### 7.3.2 実験器具：シリーズ①

静電容量式加速度センサ付き無線 IC タグの各媒体および媒質に対する適用限界を確認するために、図 7.3 に示す各種容器を選定し、媒体（容器）内に無線 IC タグを高さ固定設置させ、その後、水やモルタルの媒質を投入する。鋼製②での無線 IC タグ設置および媒質投入状況を図 7.4 に示す。



図 7.3 使用した各種容器

(左から材質がプラスチック，アクリル，鋼製①，鋼製②)

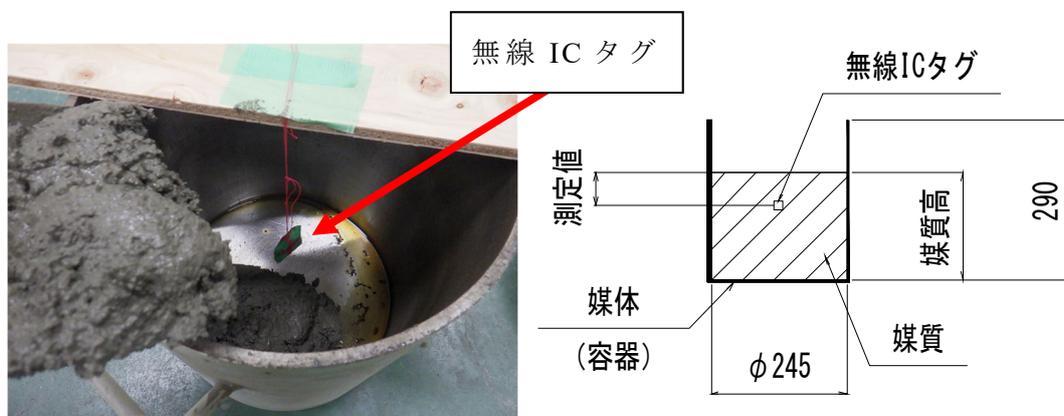


図 7.4 鋼製容器②における実験概要

### 7.3.3 実験器具：シリーズ②

無線 IC タグの適用限界を実験的に検討するための図 7.5 に示す装置を製作した。器具製作に使用したものは、以下とした。

- 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）

実験の観察を行うため，直径 200mm の塩化ビニール管および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。製作したものを箱に入れ，箱にコンクリートを充填させる。この対応は，実験において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抗するためである。製作した器具を図 7.6 の樽容器の真ん中になるように置く。図 7.6 の樽容器は直径の最低値が 600mm を下回らないようにする。無線 IC タグは水の厚さがある一定上の数値で通信に影響を及ぼすため，これを利用し，側面から出る通信を，水を用いて遮断するために側面の水の厚さは 200mm 以上を確保するようにした。製作した塩化ビニール管の中に図 7.7 のように無線 IC タグを設置し，図 7.8 のように受信機を塩化ビニール管上に設置した。

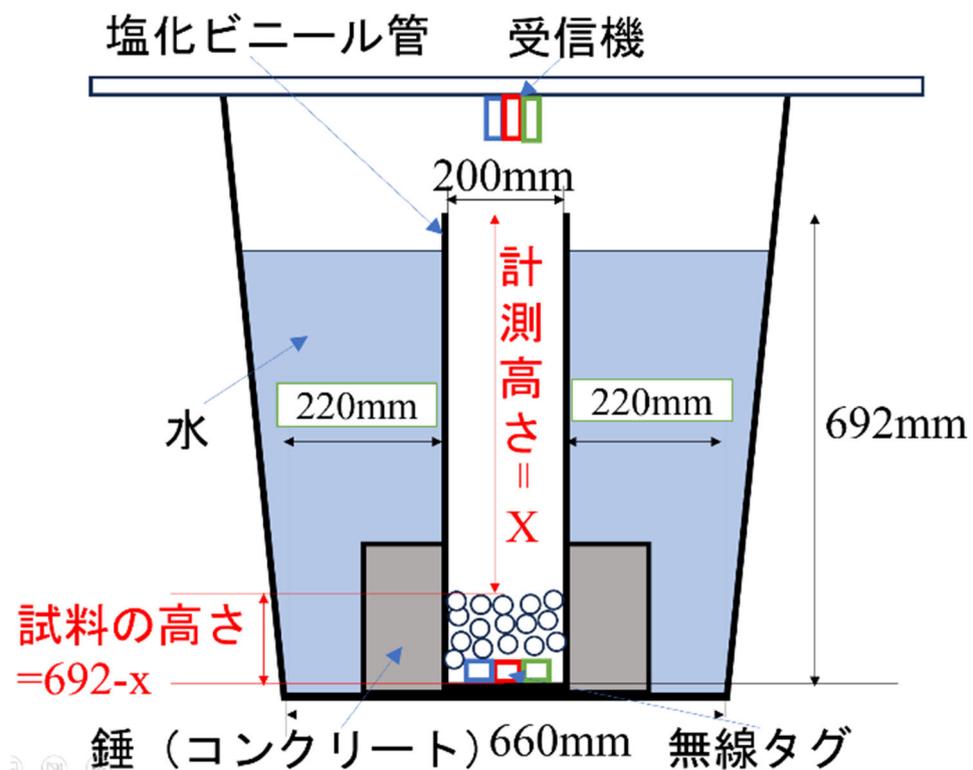


図 7.5 製作した実験装置の概要



図 7.6 樽容器



図 7.7 塩化ビニール管内部



図 7.8 受信機の設置

#### 7.3.4 無線 IC タグの計測方法：シリーズ①・②

本実験における無線 IC タグの計測方法は、第 6 章、6.3.4 同様であり、下記に計測詳細を記載する。

- 1) 設定された無線 IC タグに防水処理を行い、所定の測定位置に取付ける
- 2) 起動させたノート PC に受信機を必要数、USB ポートに接続する。
- 3) 計測用プログラムを起動し、計測前環境を整える。
- 4) 受信機を所定の位置に静置する。
- 5) 媒質を打設し、充填される媒質の伝搬加速度を受信する。
- 6) 無線 IC タグからの電波受信が不通となるまで媒質を打設継続する。
- 7) 完全に受信不通まで計測し、完了。

#### 7.3.5 計測データの整理：シリーズ②

シリーズ①における計測データについては、無線 IC タグからの通信不通の現象の有無、すなわち、発生したかしなかったかの判定であった。連続的なデータではなく、「○」or「×」であった。一方、シリーズ②は、通信の不通を連続的に取り扱った。シリーズ②のデータ整理を、下記に説明する。

図 7.9 に実験結果の一例を示す。無線 IC タグおよび時間毎に 10Hz でデータを受信し、受信した点を記録し、それらを結んだ直線群として表記することとした。本来、横軸は計測開始後からの時間が表示されるが、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を表している。左端が

起点であり、もし最大 692mm まで通信可能であれば右端は 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 よりも短くなる。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 IC タグを用いたため、その結果を 1)、2)、3) と表示した。無線通信を用いていることにより、時折通信が短時間途切れ、またすぐに通信が再開することがある。本研究では連続で 10 秒間、無線通信が不通となるまでを適用範囲として定めることとした。

図 7.9 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 IC タグ 1) は赤の縦線、無線 IC タグ 2) は青の縦線、無線 IC タグ 3) は緑の縦線の地点を意味し、各無線 IC タグでの適用範囲（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 7.9 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 IC タグの適用範囲（図 7.9 の例では 308mm）とした。また、その配合条件での区別をせず、計測した試料の中で最も適用範囲が小さかったものを最低限、無線 IC タグの作動が確認できる安定的適用範囲の許容と定めた。この適用範囲内のかぶり厚さ内に無線 IC 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、限界かぶりという位置づけである。

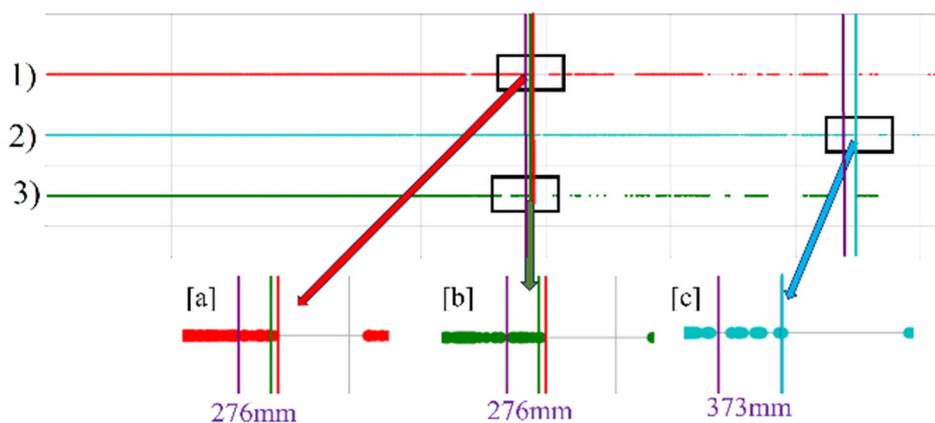


図 7.9 データ整理方法の概要

## 7.4 実験結果および考察

### 7.4.1 媒体の差異による通信適用範囲

具体的な実験を行う前段階として、媒質を大気とした場合の各媒体における無線 IC タグの通信適用範囲についての検討を行った。媒体は、屋外および屋内とし、その状況および結果を図 7.10、7.11 および表 7.5 に示す。



図 7.10 屋外での無線 IC タグの通信適用確認



図 7.11 屋内での無線 IC タグの通信適用確認

表 7.5 屋外および屋内での無線 IC タグの通信適用範囲

媒質	大気	
	屋外	屋内
媒体	屋外	屋内
通信適用範囲	25m以上	25m以上

無線 IC タグの使用環境が屋外および屋内に限らず、十分問題なく通信は行える。その適用範囲（距離）としては、25m 以上を有する。

次に容器としての媒体差異による影響を確認するため、媒質をプラスチック、

アクリルおよび鋼製とした場合の無線 IC タグの通信適用範囲についての調査を行った。その状況および結果を図 7.12 および表 7.6 に示す。

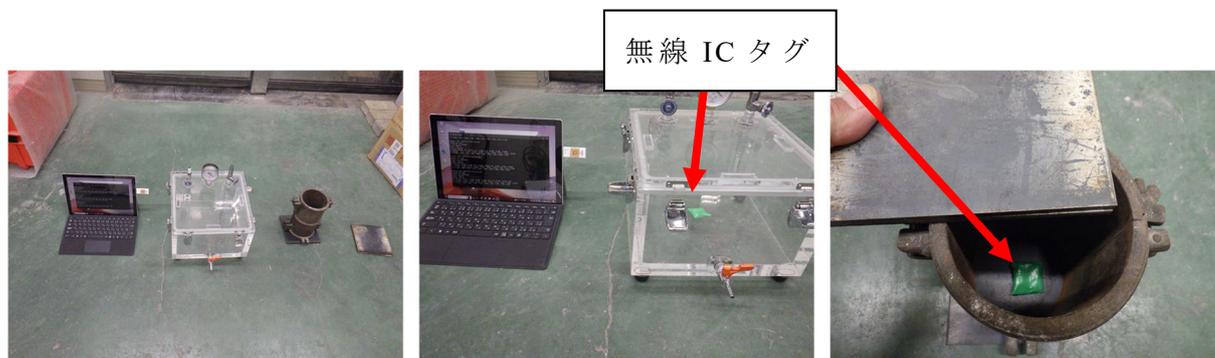


図 7.12 各媒体による無線 IC タグの通信適用確認（アクリル，鋼製①）

表 7.6 各媒体による無線 IC タグの通信適用範囲

媒質	大気			
媒体	プラスチック	アクリル	鋼製①	鋼製②
密閉状況	上部蓋無し，開放	上部蓋，密閉	上部鋼板にて密閉	上部蓋，密閉
通信適用範囲	1m以上，安定	1m以上，安定	1m以上，安定	1m以上，安定

無線 IC タグの通信において、媒体が障害となり、受信不通となる可能性について確認を行った結果、図 7.3 に示した媒体の材質がプラスチック、アクリルおよび鋼製と異なっても通信影響はほとんどないものと推測される。媒体がアクリル、鋼製①および鋼製②については、上部に蓋をし、無線 IC タグの周部が媒体でほぼ完全に密閉される状況で試験を実施していることより、各媒体における通信影響がないものと判断した。ただし、通信適用範囲（距離）を大きく想定した場合については、確認の必要がある。また、媒質が大気から水およびセメント系材料等になった場合も媒体が通信に際し、障害となる可能性も考えられる。

#### 7.4.2 媒質：水による通信適用範囲

各媒体における媒質：水による通信適用範囲について検討を行った結果を図 7.13 および表 7.7 に示す。なお、いずれの媒体も上部は蓋無しの開放状態で

試験を実施した(図 7.4)。鋼製①については、十分な水密を有していないため、実験不可とした。

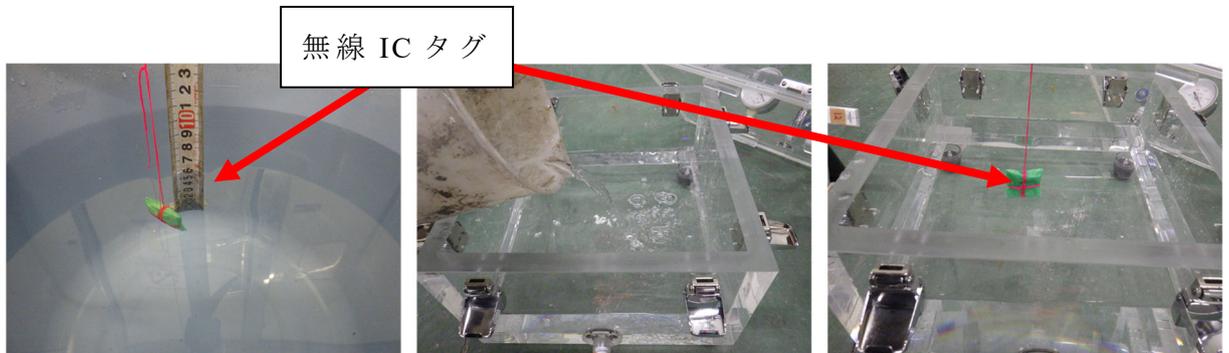


図 7.13 媒質：水による無線 IC タグの通信適用確認  
(プラスチック, アクリル)

表 7.7 媒質：水による無線 IC タグの通信適用範囲

媒質	水			
媒体	プラスチック	アクリル	鋼製①	鋼製②
通信適用範囲	65mm	65mm	実験不可	60mm

媒質：大気中での屋外および屋内における無線 IC タグの通信適用範囲は 25m 以上あることがわかっているが、媒質が水になった場合、その通信適用範囲は極端に小さくなる。本実験に使用している無線 IC タグの通信帯からして、水の影響を受ける懸念が予想されていたが、結果としては同様の傾向を示している。ただし、完全な通信不通ではなく、一定程度の通信適用範囲は有している。また、媒体の差異による影響としては、通信適用範囲が小さいため、判断が困難であるが、媒体：鋼製②の通信適用範囲がアクリルおよびプラスチックのものより幾分小さくなった。これは、表 7.1 に示している本無線 IC タグの通信帯（マイクロ波）が水や金属の影響を受けやすい可能性があることに起因した結果であると思われる。

#### 7.4.3 媒質：グラウトによる通信適用範囲

図 7.14 および表 7.8 に媒質：グラウトの通信適用範囲の実験結果を示す。

無線 IC タグの通信適用限界は、W/C=30%で 102mm, W/C=50%で 132mm, W/C=70%で 101mm と媒質：水よりもやや大きい結果となった。グラウト配合はセメントと水のみが構成材料となっているため、媒質：水よりも無線 IC タグの通信適用範囲が幾分改善されたものと推測する。一方、W/C=50%の通信適用範囲が他のものよりも大きくなっているが、W/C=30%は高粘性のフレッシュ状態、W/C=50%は軟練り低粘性のフレッシュ状態であったことが起因しているものと思われる。ゆえに練混ぜた媒質の粘性等のフレッシュ状態も無線 IC タグの通信適用範囲に影響する一要因になると判断する。

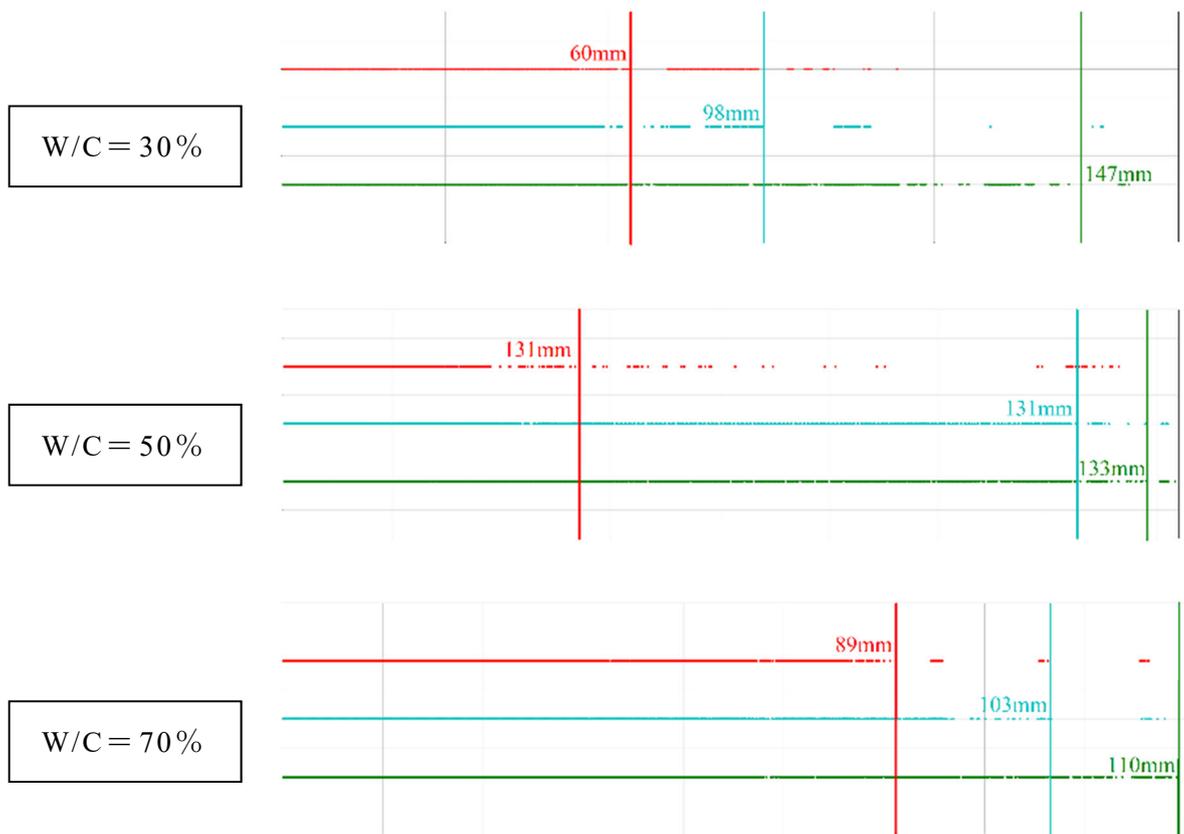


図 7.14 媒質：グラウトの各水セメント比別の通信適用範囲

表 7.8 媒質：グラウトの各水セメント比別の通信適用範囲

媒質	グラウト (シリーズ②)		
媒体	本実験用製作容器 (図7.5)		
W/C	30%	40%	50%
通信適用範囲	60mm	131mm	89mm
	98mm	131mm	103mm
	147mm	133mm	110mm
平均	102mm	132mm	101mm

#### 7.4.4 媒質：モルタルによる通信適用範囲

図 7.15 および表 7.9 に媒質：モルタルの通信適用範囲の実験結果を示す。

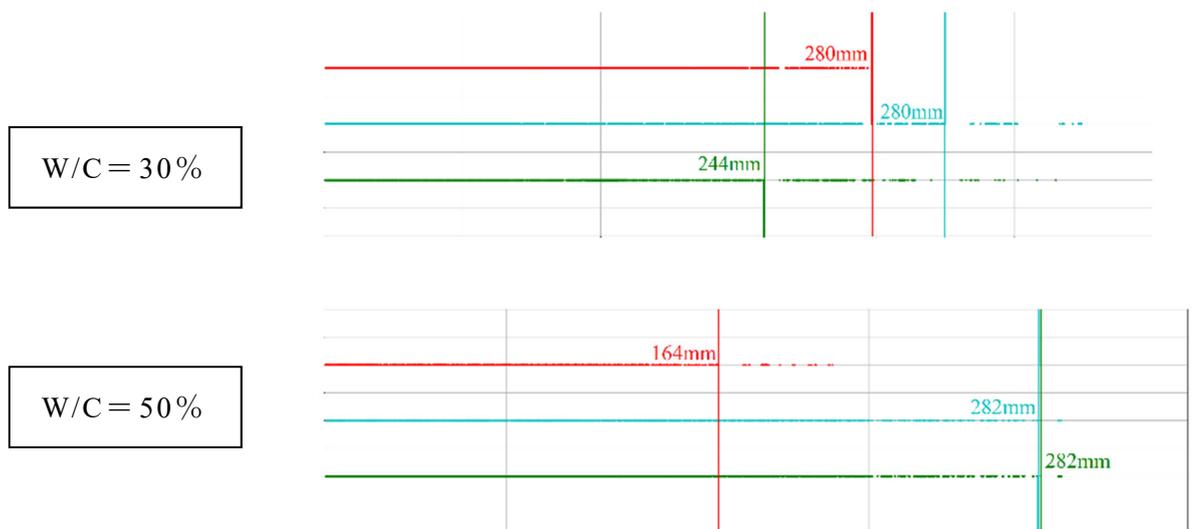


図 7.15 媒質：モルタルの各水セメント比別の通信適用範囲 (シリーズ②)

表 7.9 媒質：モルタルの各水セメント比別の通信適用範囲

媒質	モルタル (シリーズ①)	モルタル (シリーズ②)	
媒体	鋼製②	本実験用製作容器 (図7.5)	
W/C	50%	50%	70%
通信適用範囲	95mm	280mm	164mm
		280mm	282mm
		244mm	282mm
平均	95mm	268mm	243mm

無線 IC タグの通信適用範囲は、シリーズ①が 95mm、シリーズ②が約 250mm と大きな差異が生じる結果となった。実験条件として異なる要素は、シリーズ①が 1：2 モルタル配合で媒体が鋼板厚み 6mm の鋼製容器（鋼製②，上部蓋無し）であること，モルタル投入後に内部振動機で十分な締固めを実施したことが挙げられる。シリーズ②は，1：3 モルタル配合で細骨材量が多いこと，媒体がほぼ鋼製以外の材料であること，締固めが突き棒を用いていることなどが挙げられる。従って，シリーズ①がシリーズ②より，配合や締固めの差異で，フレッシュ性状において，局所的に遊離水が発生し，その影響で通信適用範囲が小さくなった可能性がある。

また，総括的な判断は難しいが，概略として，媒質：モルタルの場合，無線 IC タグの通信適用範囲は媒質：水，グラウトよりも大きくなる傾向にあると言える。ただし，無線 IC タグの通信的範囲を考慮する上で，媒質：グラウト時同様のフレッシュ状態や水の影響，媒体：鋼製による通信の障害等の影響については，排除できないものと推察する。

#### 7.4.5 媒質：コンクリートによる通信適用範囲

図 7.16 および表 7.10 に媒質：コンクリートによる通信適用範囲の実験結果を示す。

媒質：コンクリートにおけるスランプの差異が無線 IC タグの通信適用範囲へ及ぼす影響については，平均値が 285mm と 289mm と概ね同様値であることより，ほとんどないものと判断できる。

$s/a=58\%$ と一定とした媒質：コンクリートにおける  $W/C=30\%$ ， $50\%$ ， $70\%$ と変化させた場合の無線 IC タグの通信適用範囲は，280mm～310mm の範囲内で収束しており，水セメント比による明確な差異は確認されなかった。本実験結果より，媒質：コンクリートにおける無線 IC タグの安定的な通信適用範囲の許容としては，最小値である 225mm が妥当であると考ええる。

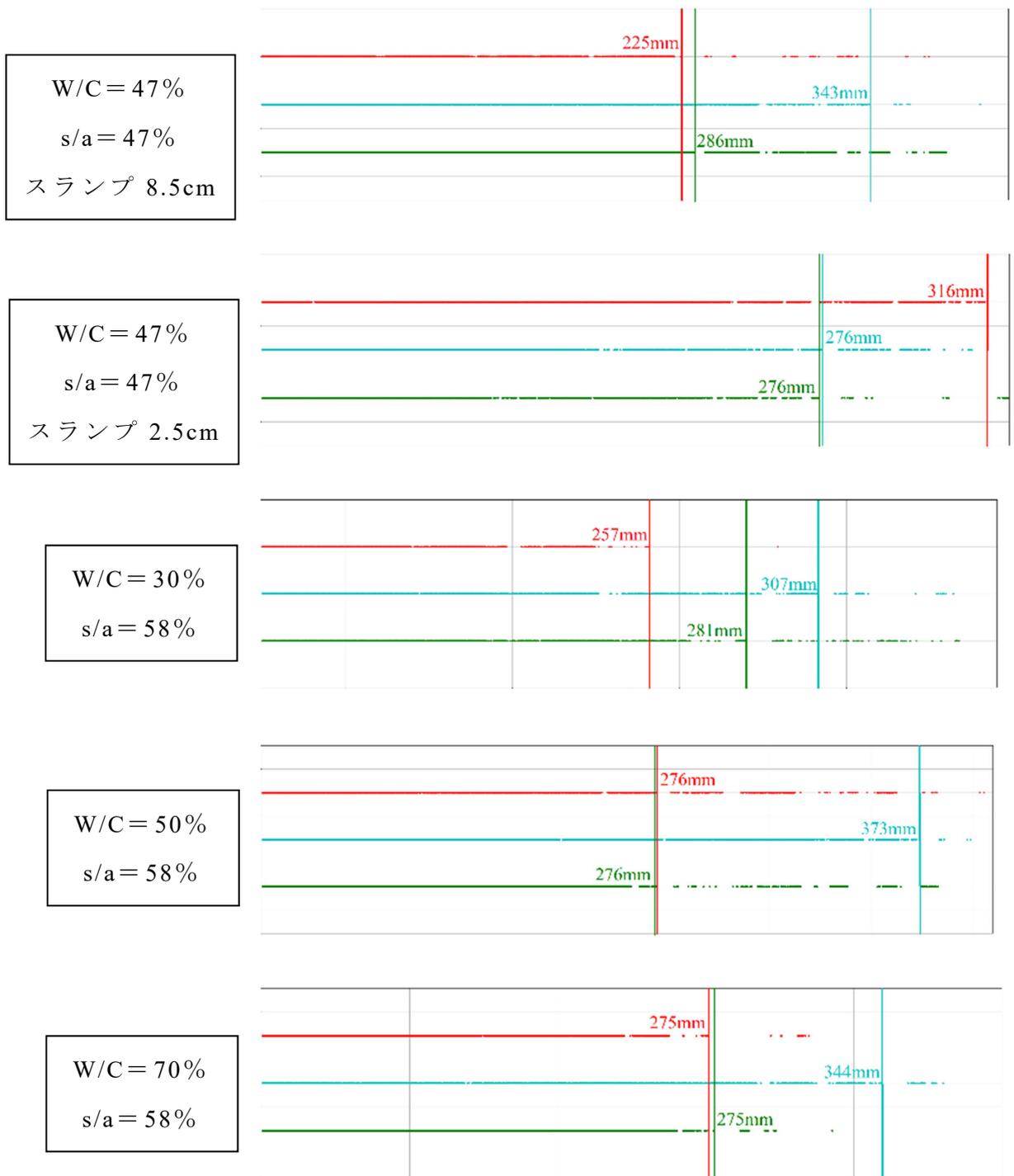


図 7.16 媒質：コンクリートの各スランプ，水セメント比別の通信適用範囲  
(シリーズ②)

表 7.10 媒質：モルタルの各水セメント比別の通信適用範囲

媒質	コンクリート (シリーズ②)				
媒体	本実験用製作容器 (図7.5)				
W/C	47%		30%	50%	70%
s/a	47%		58%		
スランプ	8.5cm	2.5cm	-		
通信適用範囲	225mm	316mm	257mm	276mm	275mm
	343mm	276mm	307mm	373mm	344mm
	286mm	276mm	281mm	276mm	275mm
平均	285mm	289cm	282mm	308mm	298mm

#### 7.4.6 各媒質における無線 IC タグの通信適用範囲

各種実験結果より、各媒質における無線 IC タグの通信適用範囲については、許容を考慮すると概ね下記となる。

- 媒質：大気 → 通信適用範囲：25m 以上
- 媒質：水 → 通信適用範囲：60mm 程度
- 媒質：グラウト → 通信適用範囲：100mm 程度
- 媒質：モルタル → 通信適用範囲：100～200mm 程度
- 媒質：コンクリート → 通信適用範囲：225mm 程度

媒質が液体から塑性体に変遷するにつれて、無線 IC タグの通信適用範囲は大きくなる傾向になると言える。また、細骨材や粗骨材が混入されることにより、骨材が無線通信の誘導体となり、通信適用範囲が大きくなるものと考えられる。

従って、媒質：コンクリートでの安定的な通信適用範囲は 225mm となり、一般的なコンクリート構造物の最小かぶりは 100mm～200mm、プレキャストコンクリート製品は、100mm 以下の範囲が多いことより、かぶりコンクリート部への無線 IC タグを用いたコンクリートの伝搬加速度の計測には非常に有効であることが確認できた。

## 7.5 本章のまとめおよびコンクリートの伝搬加速度測定に関する今後の展望

静電容量式加速度センサ付き無線 IC タグが受信不通となる事象を改善するために、無線 IC タグを大気、プラスチック、アクリル、鋼製の各媒体および大気、水、グラウト、モルタル、コンクリートの各媒質に埋没させ、その通信適用範囲を評価するための実験的検討を行った。

本実験の範囲内で得られた知見を下記に記す。

- (1) 無線 IC タグは、媒体および媒質：大気であれば、屋内外で 25m 以上の通信適用範囲を有する。
- (2) 無線 IC タグは、媒質が大気の場合、媒体がプラスチック、アクリル、鋼製であれば、概ね良好な通信適用状態である。
- (3) 無線 IC タグの通信適用範囲は、媒質が水、グラウト、モルタル、コンクリートと液体から塑性体へと変化するにつれて、その範囲長さが大きくなる。また、媒質：コンクリートにおいて、W/C や s/a およびスランプの差異による通信適用範囲への影響は小さい。
- (4) 媒質：コンクリートにおける通信適用範囲は、225mm であった。したがって、同時多点加速度計測システムは、プレキャストコンクリート製品を含めたかぶりに充填されるコンクリートの締固め中の伝搬加速度を計測することが十分可能である。

今回、静電容量式加速度センサ付きの無線 IC タグの通信適用範囲は、媒質によって、その範囲が異なることが判明した。また媒質：コンクリートにおける無線 IC タグの通信適用範囲は、225mm 程度とかぶりコンクリート部位での伝搬加速度計測上では、十分な数値を有していると言える。フレッシュコンクリートの締固め作業時に特に注意を有する部位は、かぶりコンクリート部であることから、静電容量式加速度センサ付きの無線 IC タグを用いた完全無線化のフレッシュコンクリートの伝搬加速度を計測するシステムは、種々の施工現場の計測に有効である。

一方、無線 IC タグを用いた研究<sup>3)</sup>は、今後より一層発展的になることが予想される。無線 IC タグ自体の技術革新も飛躍的に進行するはずである。今回使用した無線 IC タグは、受信不通状態となったものをコンクリート内から取出し、その後、再度動作確認したが、故障等なく、一定程度の耐久性も有していることが分かった(図 7.17)。



図 7.17 受信不通過後，回収した無線 IC タグの再動作確認状況

静電容量式加速度センサ付き無線 IC タグを用いた完全無線化のフレッシュコンクリートの伝搬加速度計測システムは，経済性，測定時の作業性および耐久性など優れている。しかしながら，依然として不明および不明瞭な点が存在する。現場打ちコンクリート構造物やプレキャストコンクリート製品に使用される一定厚みのある鋼製型枠内の場合，無線 IC タグの通信適用範囲が前述の結果より小さく，かぶりコンクリートの厚みが 30mm 以下のレベルでも受信不通過となる時がある。媒体：鋼製の厚みによる通信適用範囲の減少，打設コンクリートの落下衝撃による無線 IC タグの計測加速度の許容外，振動締固め時のフレッシュコンクリートの局所的な媒質：水近似化による通信適用範囲の減少などが考えられるが，いずれも要因解明に至っていない現状にある。

従って，フレッシュコンクリートの伝搬加速度の計測においては，現状の範囲内では，やはり前章でも述べた通り，静電容量式加速度センサ付き無線 IC タグを用いた完全無線化計測システムとシングルボードコンピューターおよび静電容量式の加速度センサを用いた一部有線による計測方法とを部位毎に併用使用とすることが望ましいと考える。

具体的には，以下に述べる。

●無線 IC タグによる完全無線化計測システム

- 適用箇所：かぶりコンクリート厚 200mm 以下  
 コンクリートの打設落下による影響ない部位  
 無線 IC タグの固定方法は，特別な指定なし

● シングルボードコンピューター，加速度センサを用いた一部有線による計測システム

→ 適用箇所：かぶりコンクリート厚指定なし

加速度センサの有線接続が可能な部位

加速度センサの固定方法，要注意

## 第7章の参考文献

- 1) 株式会社村田製作所：RFID 基礎知識， <https://solution.murata.com/ja-jp/service/rfid-solution/basic/>
- 2) モノワイヤレス株式会社：磁気・加速度センサー無線タグ TWELITE® CUE， <https://mono-wireless.com/jp/products/twelite-cue/index.html>
- 3) 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，日本建築学会報告集，第 15 巻，第 29 号，9-14，pp.9-14，2009.2

## 第 8 章 結 論

### 8.1 本研究の結論

本研究は、近年の建設従事者の減少および高齢化、建設業界における作業関係の改善、省力化および生産性向上、プレキャストコンクリートの積極的活用の社会的背景、フレッシュコンクリートの充填および締固め作業における定量的基準や評価の構築等の研究的背景が存在する。それらの対策として、プレキャストコンクリート型枠に設置する外部振動機の最適配置を目的としたプレキャスト型枠内に充填するコンクリートの伝搬加速度の定量化について実験的検討を室内および実機レベルで行ったものである。

本研究で得られた結果をまとめると以下のようになる。

#### (1) プレキャストコンクリートを想定したフレッシュコンクリートに伝搬される加速度の計測システム

プレキャストコンクリートを想定したフレッシュコンクリートに伝搬される加速度の計測システムを開発し、室内実験にて、そのシステムの有用性を検討した。その結果、シングルボードコンピュータと圧電素子の 3 軸加速度センサを使用し、通信規格 IEEE802.15.4 の環境下の遠隔操作で、充填過程のプレキャストコンクリートを想定したフレッシュコンクリートの合成加速度を直接的に計測実施することができた。

一部有線が含まれるが、本加速度計測システムは無線通信であり、同時多点計測が有用であることが確認された。

また、本加速度計測システムで計測された合成加速度が変化する要因は、内部振動機と加速度センサの距離減衰が主たる要因であることを明らかにした。

プレキャストコンクリート工場で実際に製造されたフレッシュコンクリートでも室内レベルと同様に合成加速度を計測することが可能であることが明らかとなった。

#### (2) プレキャストコンクリートを想定したコンクリートの模擬型枠内に充填される伝搬加速度

前述の今回開発したシングルボードコンピュータと圧電素子の3軸加速度センサを使用し、通信規格 IEEE802.15.4 の環境下の遠隔操作で計測する加速度計測システムを用いて、プレキャストコンクリート工場で製造された配合のコンクリートを模擬型枠内に振動締固めし、その工程途中におけるフレッシュコンクリート内部の加速度計測を実施し、その有用性の評価に関する実験的検討を行った。その結果、型枠外部からの加速度計測ではなく、締固め途中のフレッシュコンクリート自体の加速度計測手法を示すことが可能となった。

締固め時に流動するフレッシュコンクリート内部に発生する加速度は、配筋されている鉄筋による障害や距離の減衰によって減少するということが数値をもって示された。

また、締固め途中の流動するフレッシュコンクリート内部の加速度はスランプにほぼ依存しないことを明らかにした。

### (3) プレキャストコンクリート型枠内を充填するフレッシュコンクリートの伝搬加速度の計測および定量化

前述の有用性を確認した加速度計測システムについて、完全無線化ではない事項に改良および改善を施した。同時多点計測を可能にした無線 IC タグを使用した完全無線化の加速度計測手法を構築し、プレキャストコンクリート工場で製造される製品を対象に、その型枠内へ打設される有スランプおよび締固めを要する高流動のフレッシュコンクリートの伝搬加速度を計測した。外部振動機によって締固めエネルギーが付与されるプレキャストコンクリート製品において、フレッシュコンクリートの締固め伝搬加速度が与える影響について実験的検討を行った。その結果、プレキャストコンクリートの型枠内に充填されるフレッシュコンクリートの伝播加速度を静電容量式加速度センサ付きの無線 IC タグを使用し、計測できることが分かり、完全無線化したフレッシュコンクリートの伝搬加速度計測システムが完成した。

実機で製造されたプレキャストコンクリートのスランプやスランプフローが大きく変わっても、プレキャストコンクリート型枠の同一部位で計測した加速度の大きさは同程度であることが分かった。

無線 IC タグによるフレッシュコンクリート内の伝播加速度は、外部振動機

近傍では、大きな値(100~150m/s<sup>2</sup>程度)となり、遠い箇所では、小さい値(50m/s<sup>2</sup>以下)を示し、その差異は外部振動機の加振位置からの減衰作用と考えられることが明らかとなった。

本研究の範囲内では、プレキャストコンクリートのフレッシュ状態による伝搬加速度を同時多点計測するシステムの構築およびその計測の有用性、外部振動機を用いて、プレキャストコンクリート型枠に充填されるコンクリートの伝搬加速度の定量化が可能となった。

#### (4) 静電容量式加速度センサ付き無線 IC タグのコンクリート媒質への 通信適用範囲

静電容量式加速度センサ付き無線 IC タグが受信不通となる事象が散見された。これらの事象を解決および改善することを目的に、無線 IC タグを大気、プラスチック、アクリル、鋼製の各媒体および大気、水、グラウト、モルタル、コンクリートの各媒質に埋没させて、無線 IC タグの通信適用範囲を評価するための実験的検討を行った。その結果、無線 IC タグは、媒体および媒質が大気であれば、屋外および屋外等の外部環境に関わらず 25m 以上の通信適用範囲を有することが分かった。

無線 IC タグは、媒質が大気の場合、媒体がプラスチック、アクリル、鋼製であれば、通信状態は概ね良好であり、媒体が通信に及ぼす影響は確認されなかった。

無線 IC タグの通信適用範囲は、媒質が水、グラウト、モルタル、コンクリートと液体から塑性体へと変化するにつれて、その通信範囲長は長くなる傾向になることが認められた。

また、媒質がコンクリートである場合、W/C や s/a およびスランプの差異による通信適用範囲への影響は比較的小さい傾向にあることが認められた。

本実験の範囲内では、媒質がコンクリートにおける通信適用範囲は、225mm であることが確認された。

静電容量式加速度センサ付き無線 IC タグによる同時多点加速度計測システムは、プレキャストコンクリート製品を含めたかぶり部に充填されるコンクリートの締固め中の伝搬加速度を計測することが十分可能であることがわかった。

## 8.2 今後の課題および展望

今回、シングルボードコンピュータと圧電素子の3軸加速度センサを使用し、通信規格 IEEE802.15.4 の環境下の遠隔操作で、フレッシュコンクリートの合成加速度を直接的に計測するシステムは構築できた。一方で、本計測システムは一部有線となっており、完全無線化の計測システムではないこと、加速度センサの固定方法などの課題が残った。

上記システムの改善および改良を加えた静電容量式加速度センサ付きの無線 IC タグを用いた完全無線化のフレッシュコンクリートの伝搬加速度を計測するシステムについても構築することができた。加速度センサの固定方法についても流動するコンクリートの影響を概ね除外することができること、プレキャストコンクリート型枠内に充填するフレッシュコンクリートの伝搬加速度についても直接的確認することができるようになった。

今日まで経験則に基づいていたプレキャストコンクリート型枠の部材設計や外部振動機の設置位置等をより合理的に設計および配置するための基礎資料になり得る実験結果を求める手法が構築できたものとする。プレキャスト型枠に取付ける外部振動機の最適な配置位置および個数などの合理的設計手法を具体的に提案できる段階までは至っていないことが挙げられる。今後も継続した試験データの蓄積やプレキャスト型枠メーカーとの情報共有など解決すべき課題は多岐にわたるものとする。

静電容量式加速度センサ付き無線 IC タグを用いた完全無線化のフレッシュコンクリートの伝搬加速度計測システムは、経済性、測定時の作業性および耐久性など優れている。シングルボードコンピュータと圧電素子の3軸加速度センサを使用した有線の計測システムも同様である。

しかしながら、完全無線化による同時多点加速度計測システムとも依然として、装置全体の耐久性、無線 IC タグの個体差、無線 IC タグが埋め込まれたままによるコンクリートの硬化性状等の検討課題改善点が存在する。

従って、フレッシュコンクリートの伝搬加速度の計測においては、現状の範囲内では、両システムを適材適所で併用使用することが望ましいと考える。

## 謝 辞

本論文は、筆者が徳島大学 大学院先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 建設創造システム工学コースに入学して以降、プレキャストコンクリートを対象としたフレッシュコンクリートの伝搬加速度の計測等に関する研究成果を取りまとめたものです。

本研究の遂行および成果をまとめるにあたり、終始懇切丁寧なご指導とご助力を賜りました指導教官の徳島大学 大学院社会産業理工学研究部 橋本親典教授には、謹んで感謝の意を表し、厚く御礼申し上げます。

審査の労を賜りました徳島大学 大学院社会産業理工学研究部 上田隆雄教授、野田稔教授には深く感謝申し上げます。さらに専門的な見地でご指導賜りました徳島大学 大学院社会産業理工学研究部 渡邊健研究教授、中田成智准教授をはじめとする諸先生方に感謝の意を表します。

徳島大学 河野清名誉教授、水口裕之名誉教授には、筆者の徳島大学工学部建設工学科在籍時から大変貴重なご指導、ご助言をいただき、心より御礼申し上げます。

本研究を進める過程においては、徳島大学技術支援部 石丸啓輔技術専門員をはじめ、当時在籍含めましてコンクリート研究室の藤原京介様、池澤壮太様、原悠也様ならびに研究室の皆様には、大変なご協力やご支援をいただき、誠にありがとうございました。

コンクリート系研究室の諸先輩であられます高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 横井克則教授、和歌山工業高等専門学校 環境都市工学科、三岩敬孝教授、四国電力(株) 加地貴様、千葉工業大学 創造工学部 都市環境工学科 橋本伸一郎准教授には、日頃より励ましのお言葉や研究に関するご助言をいただき、深く感謝申し上げます。

実験に多大なるご理解とご協力を賜りました筆者が勤務しております日本興業株式会社、同開発部の山田雅宏部長、亀山剛史次長、細川恭平課長、松山哲也顧問をはじめとする部員の皆様、藤田学生産改善部長、中尾哲生産改善副部長をはじめとする高松工場ならびに徳島工場（市場製造所、阿波製造所）の皆様方には、心より御礼申し上げます。

また，本論文を作成するにあたって支援していただきました妻，長男および両親に感謝いたします。

最後に，本研究でご協力，ご支援いただきましたすべての方々のご健勝とますますのご活躍を祈念いたしまして感謝の言葉とさせていただきます。

令和6年3月 山地 功二