

論文 コンクリートの締固めを再現するために改造したL型フロー試験装置を用いた棒状バイブレータの距離減衰の定量的評価

橋本親典*1・藤原京介*2・渡邊 健*3・石丸啓輔*4

要旨: 有スランブコンクリートの締固めには、棒状バイブレータを用いることが原則である。しかしながら、挿入間隔や振動時間は施工者の経験的技量に依存しているのが現状である。著者らは、静電容量型加速度センサを搭載した無線タグを複数個を用いて、加速度を同時多点計測するシステムを独自に開発した。コンクリートの締固めを想定した供給側を改造したL型フロー試験装置とこの計測システムを用いて、棒状バイブレータの振動エネルギーの距離減衰の定量的評価を試みた。その結果、棒状バイブレータの挿入間隔が50cm以下、振動時間5～15秒という示方書の記述は妥当であることが明らかになった。

キーワード: 振動締固め、フレッシュコンクリート、L型フロー試験、距離減衰、加速度、無線タグ

1. はじめに

有スランブコンクリートの締固めには、棒状バイブレータを用いることが原則である。コンクリートを十分に締め固められるよう、棒状バイブレータの挿入間隔および1か所あたりの振動時間を定める必要がある。しかしながら、打ち込まれるコンクリートのスランブのみならず、配筋状況や作業足場の設置状況によって締固め作業高さが異なる。したがって、挿入間隔や振動時間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」の条文では、『(2)棒状バイブレータの挿入間隔は、振動が有効であると認められる範囲の直径以下かつ50cm以下とする。(3)棒状バイブレータの挿入位置は一箇所あたりの振動時間は、使用するコンクリートに応じて5～15秒の範囲内で定めるものとする。』と記述されている。この条文に対する【解説】には、『棒状バイブレータの振動エネルギーは、棒状バイブレータの振動により発生した振動波によりコンクリート中を伝播するが、起振点(棒状バイブレータの挿入位置)から距離が離れるほど減衰する。このため、棒状バイブレータの挿入間隔は、均質な締固めを行うことができるよう、振動の伝播が及ぶ有効範囲から設定する必要がある。』と記述されている。さらに『様々な混和材と混和剤の組合せにより、スランブ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。

挿入間隔が50cm以下、振動時間5～15秒という記述以外は締固めに関する定量的表記がないというのが現状

である。棒状バイブレータの振動により発生した振動波の加速度が伝播する状況を定量的に計測できる手法がないことが一因であると思われる。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つである。

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複数の無線タグを用いて、加速度を同時多点計測するシステムを独自に開発した。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²⁾。

本研究では、この計測システムを用いて、棒状バイブレータの振動エネルギーの距離減衰の定量的評価を試みた。高流動コンクリート用に提案されたL型フロー試験装置の供給側を改造することによって、実験室規模でコンクリートの振動締固めを再現した。

主たる実験パラメータは、スランブと振動エネルギーであり、振動時間に伴う任意の位置の加速度の時系列データを求め、距離減衰を定量的に評価した。

2. 同時多点加速度計測システムおよび改造L型フロー試験装置について

2.1 同時多点加速度計測システム

図-1に本研究で用いた同時多点加速度計測システムの概要を示す。

ノートPCに接続した受信機を介し、加速度の時系列データを受信し計測を行った。本計測システムは、無線通信であるため、無線タグと受信機は通信を遮断するものがない限り、数100m離れていても通信が可能である。

本機の通信規格はIEEE802.15.4である。従来の有線に

*1 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 教授 工博 (正会員)

*2 ヤンマー情報システムサービス (株)

*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)



図-1 加速度計測システムの概要



図-2 防水加工した無線タグ

よる加速度計測とは異なり、施工現場で自由度が高い。

無線タグは、防水加工として、養生テープで巻いて使用した。図-2に防水加工した無線タグの概観（左から2番目）を、本体、ボタン電池および100円玉と比較して示す。防水加工した状態の概略寸法は、幅25mm×高さ25mm×厚さ10mmである。

無線タグによって得られるデータは、1/100秒の時間間隔の3軸加速度である。無線タグの位置が固定されていないため、3軸の座標軸は絶えず変動する。よって、3軸方向の加速度ベクトルの総和を加速度の代表値(以下、合成加速度とする)として処理した。

$$a = \sqrt{ax^2 + ay^2 + az^2} - g \quad (1)$$

a : 合成加速度 (m/s^2)

ax, ay, az : 各軸の加速度 (m/s^2)

g : 標準重力加速度 (m/s^2)

なお、無線タグに搭載されている静電容量型加速度センサの信号処理の詳細については、参考文献³⁾に記載しているため、本論文では省略する。

2.2 改造L型フロー試験装置

L型フロー試験は、高流動コンクリートの流動性を評価することを目的として使用される。棒状バイブレータによる振動締固めコンクリートを対象としていない。本研究では、コンクリートを充填する供給側の容器(A室)を改造し、棒状バイブレータによる振動締固めによって流動路側(B室)に流動する状況を再現した。

図-3に本研究で用いた改造L型フロー試験装置および鉄筋格子を示す。L型フロー試験装置の鉄筋格子は、無線タグを所定の位置に設置するための固定用である。養生テープで防水加工した無線タグをナイロン製ネットに入れ、ネットを鉄筋に括り付けて流動路の所定の位置に固定した。図-3にナイロン製ネットを鉄筋格子に括り付けた状況を示す。表-1に各無線タグの棒状バイブレータからの距離を示す。

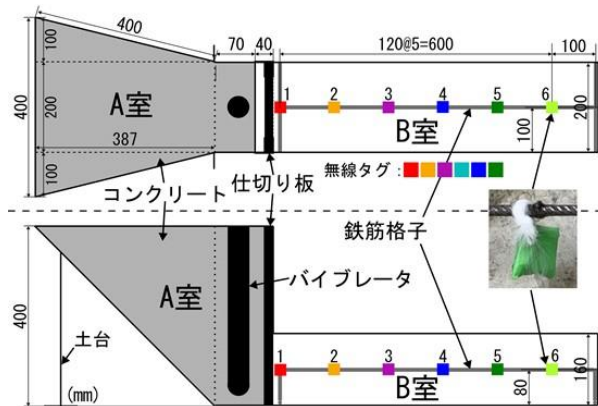


図-3 改造L型フロー試験装置の概観

表-1 各無線タグのバイブレータからの距離

無線タグ番号	1	2	3	4	5	6
棒状バイブレータからの距離(mm)	80	200	320	440	560	680

3. 振動締固め実験

3.1 概要

本研究の目的は、棒状バイブレータの振動エネルギーの距離減衰の定量的評価である。距離減衰は、2で説明した同時多点加速度計測システムを用いて計測した加速度の時系列データから定量的に評価した。

ところで、締固め過程は、棒状バイブレータの振動エネルギーによってコンクリートが液状化することによって流動し、所定の型枠内に充填される過程である。流動過程と充填過程が同時起こり、その現象は複雑である。本研究では、振動締固めの初期条件を変えることで、流動過程と充填過程の分離を試みた。

具体的には、振動締固め実験の初期条件として、A室からコンクリートが流動する状態（以下、初期充填時と称す）とすでにB室にコンクリートが充填された状態（以下、初期充填完了後と称す）である。

3.2 初期充填時と初期充填完了後の締固め実験方法

締固め実験は、初期充填時と初期充填完了後で初期状態が異なる。以下に、別々に締固め実験方法を記す。

(1) 初期充填時の締固め実験

- 1) 供給側 A 室に付き棒を用いて3層に分けてコンクリートを充填する。
- 2) 静かに棒状バイブレータを所定に位置に挿入する。
- 3) 棒状バイブレータの加振と同時に仕切り板を開け、加速度の計測を行う。
- 4) 流動路 B 室にコンクリートが流動し充填が完了した後、加振を停止する。
- 5) 加速度の計測を終了する。

(2) 初期充填完了後の締固め実験

- 1) 流動路 B 室に2層に分けて付き棒を用いてコンクリ

ートを充填する。

- 2) 静かに棒状バイブレータを所定に位置に挿入する。
- 3) 棒状バイブレータの加振と同時に加速度の計測を行う。
- 4) 加振時間 90s 後に加振を停止し、加速度の計測を終了する。

本実験で使用した棒状バイブレータの仕様は、全長 784mm、重量 5kg、出力 280W、電流 5A、振動部の直径 28mm と長さ 475mm である。L 型フロー試験の充填されるコンクリートの体積に対して棒状バイブレータの振動力は大きい。可変変圧器を用いて棒状バイブレータの振動力を低減させた。100V と 70V の 2 段階とした。

さらに、初期充填が完了し充填後に流動路の B 室の側面からの振動波の反射の影響を評価することを目的として、図-3 に示す無線タグ 4 の位置で、図-4 に示す流動軸直角方向に鉄筋格子を配置し、無線タグを左右の壁面に据え付けて、壁面と中央の加速度の分布を計測した。

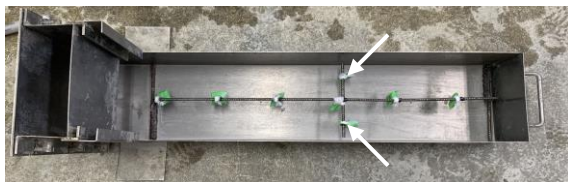


図-4 無線タグ 4 の位置に、流動部 B 室の左右の壁面(矢印)と中央に据え付けた無線タグの設置状況

3.3 使用材料および配合

表-2 に本研究に供した使用材料の材料特性を示す。表-3 にコンクリートの配合表を示す。配合は 1 種類である。スランブが加速度の減衰特性に及ぼす影響を明らかにするために、同一配合のコンクリートをスランブロスさせて振動締固め実験を実施した。

練混ぜ直後の目標スランブは、 $21 \pm 2.5\text{cm}$ として、5cm 前後まで 6 段階のスランブに対して振動締固めを行い、加速度計測を実施した。振動締固め実験に供したコンク

表-2 使用材料の物性

種類	記号	品名	密度 (g/cm^3)	粗粒率	備考
セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.15		S社製普通ポルトランドセメント(株)
細骨材	S	砕砂	2.58	2.83	兵庫県赤穂市
粗骨材	G1	砕石1505	2.57	6.39	徳島県板野郡板野町大坂字川走
	G2	砕石2010	2.57	7.04	徳島県板野郡板野町大坂字川走
混和剤	SP	高性能AE減水剤	1.03		ポリカルボン酸エーテル系化合物
	AE	AE剤	1.02		アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤

表-3 配合表

水セメント比W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m^3)				
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
						G1	G2
47	47	4.5	165	350	823	555	386

リートの練混ぜは、2 バッチ実施した。1 バッチの練混ぜで作製したコンクリートは 600 とし、所定のスランブにおいて空気量試験やコンクリート温度の計測を実施したあとに振動締固め実験を実施した。なお、実験に供したコンクリートは、練り舟に戻し、静置した状態でスランブロスをして、次のスランブにおいて、再度振動締固め実験を繰り返した。

上述した通り振動締固め実験は、初期充填と初期充填完了後の 2 種に対して実施した。使用材料や配合はすべて同一であるが、棒状バイブレータの振動力や練混ぜ容量や計測時間の関係から、振動締固め実験に供したコンクリートの製造日は異なり、棒状バイブレータの振動力別に、初期充填時と初期充填完了後の振動締固め実験で、それぞれ 2 バッチのコンクリートを練り混ぜた。ただし、初期充填完了後の振動力 70V の振動締固め実験はスランブを 3 段階に変化させた 1 バッチのみで実施した。そのため、練混ぜのバッチ数は全部で 7 バッチになった。材齢 28 日圧縮強度は、振動締固め実験が終了したあとに供試体を作成したため、同一バッチに対しては同一強度とした。

4. 実験結果および考察

4.1 フレッシュ性状および材齢 28 日圧縮強度

表-4 と表-5 に初期充填時と初期充填完了後の締固め実験に供したコンクリートのフレッシュ性状および材齢 28 日圧縮強度を、棒状バイブレータの出力を 100V と 70V 別に、スランブの大きさ順に示す。そのため、バッチ番号は昇順になっていない。

配合はすべて同一であるが、練混ぜの実施日が異なるため、空気量が $4.5 \pm 1.5\%$ に許容範囲になっていない場合がある。これは、高性能 AE 減水剤の練置き時間やスランブロスの経時に対する影響があったためと思われる。一方、7 バッチの圧縮強度の平均値は 49.7N/mm^2 、標準

表-4 初期充填時の締固め実験に供したコンクリートのフレッシュ性状および材齢 28 日圧縮強度

棒状バイブレータの出力(V)	バッチ番号	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度($^{\circ}\text{C}$)	材齢28日圧縮強度 (N/mm^2)
100	第1バッチ	21.0	6.5	18.8	51.0
	第2バッチ	18.0	4.0	19.7	53.8
	第1バッチ	13.5	3.5	19.1	51.0
	第2バッチ	8.0	3.8	19.3	53.8
	第1バッチ	5.0	3.3	18.3	51.0
	第2バッチ	2.0	3.5	18.8	53.8
70	第3バッチ	20.0	4.5	19.8	49.7
	第3バッチ	15.0	3.0	18.9	49.7
	第4バッチ	14.0	4.1	20.4	57.4
	第3バッチ	11.5	3.0	18.2	49.7
	第4バッチ	6.0	4.0	20.3	57.4
	第4バッチ	4.0	3.8	20.2	57.4

表－5 初期充填完了後の締固め実験に供したコンクリートのフレッシュ性状および

棒状バイブレータの出力(V)	バッチ番号	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度(°C)	材齢28日圧縮強度 (N/mm ²)
100	第5バッチ	23.5	1.5	21.7	39.2
	第6バッチ	21.0	4.4	22.1	47.9
	第5バッチ	16.0	1.1	21.3	39.2
	第5バッチ	10.0	1.4	21.1	39.2
	第5バッチ	7.5	1.5	21.2	39.2
	第6バッチ	2.5	3.9	21.2	47.9
70	第7バッチ	17.5	6.2	18.6	48.8
		14.5	3.5	17.5	
		4.5	3.2	16.8	

偏差 5.24N/mm²、変動係数 10.5%であった。最大と最小で 18.2N/mm²の差はあるものの、変動係数の値としては通常の管理範囲であった。

4.2 加速度の時系列データ

図－5 に本計測システムによって得られた棒状バイブレータの出力 100V の初期充填時の加速度の 100Hz(0.01s) の時系列データの一例として、スランプ 21.0cm と 5.0cm を示す。無線タグの番号と色は、図－3 の改造 L 型フロー試験装置の概観に示す番号と色に対応している。各時系列データ中の黒線は、100Hz の生データの 0.01s のデータ 10 点を平均した移動平均による時系列データである。10 点の移動平均によって加速度の振動が収束した。

4.3 以後の考察では、移動平均した加速度データを用いた。

無線タグ 1 から 6 に従い、加速度の最大値を示す時刻

が移動した。これは、コンクリートが振動締固めによって供給側の A 室から流動路の B 室に流動しているためである。

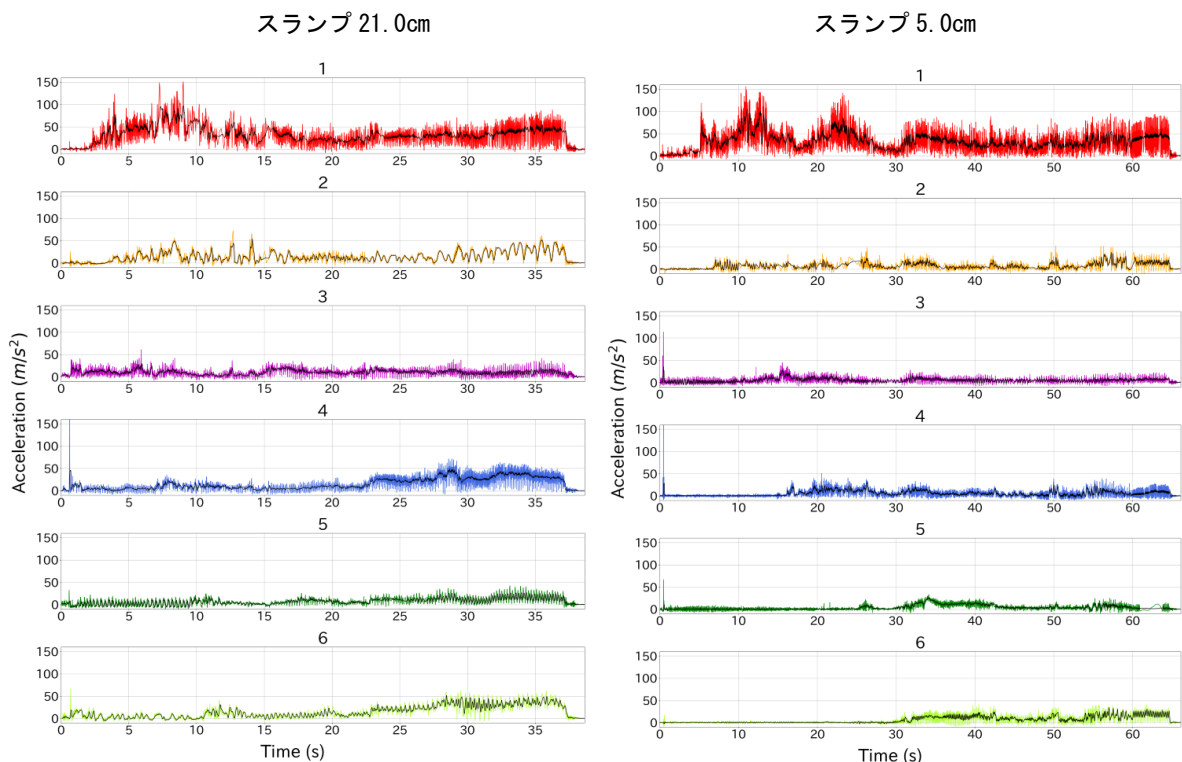
無線タグ 1 から 2 で加速度が大きく減衰した。無線タグ 2 以降の減衰は顕著でなく、棒状バイブレータからの距離が遠くなるのもかかわらず最大加速度が大きくなった場合もあった。無線タグ 2 から 6 の加速度の変動幅は大きく変化していないと判断できた。つまり、無線タグ 6 の距離まで棒状バイブレータの振動波は伝播するというを意味する。

スランプが小さくなると流動速度が遅くなるため、振動時間は長くなるが、最大加速度の距離減衰の傾向は同様であった。

図－6 に棒状バイブレータの出力 70V の初期充填時の加速度の 100Hz (0.01s) の時系列データの一例としてスランプ 20.0cm と 11.5cm を示す。出力が 70V のため、コンクリートに伝播される加速度が小さかった。縦軸の加速度の最大値を 50m/s²とした。全体の傾向は、出力 100V の場合と同様であった。スランプが小さくなるに従い振動時間は長くなったが、距離減衰の傾向は同じであった。

実験パラメータ間の影響を検討するために、加速度の移動平均の時系列データから、振動計測をした全時間における加速度の平均値と標準偏差を求めた。

計算に用いた振動計測時間は全振動計測時間とした。そのため、最大スランプの場合は 40s 前後であるが、最小スランプ場合は 180s 前後になった。ただし、出力の



図－5 棒状バイブレータの出力 100V の初期充填時の加速度の時系列データの一例

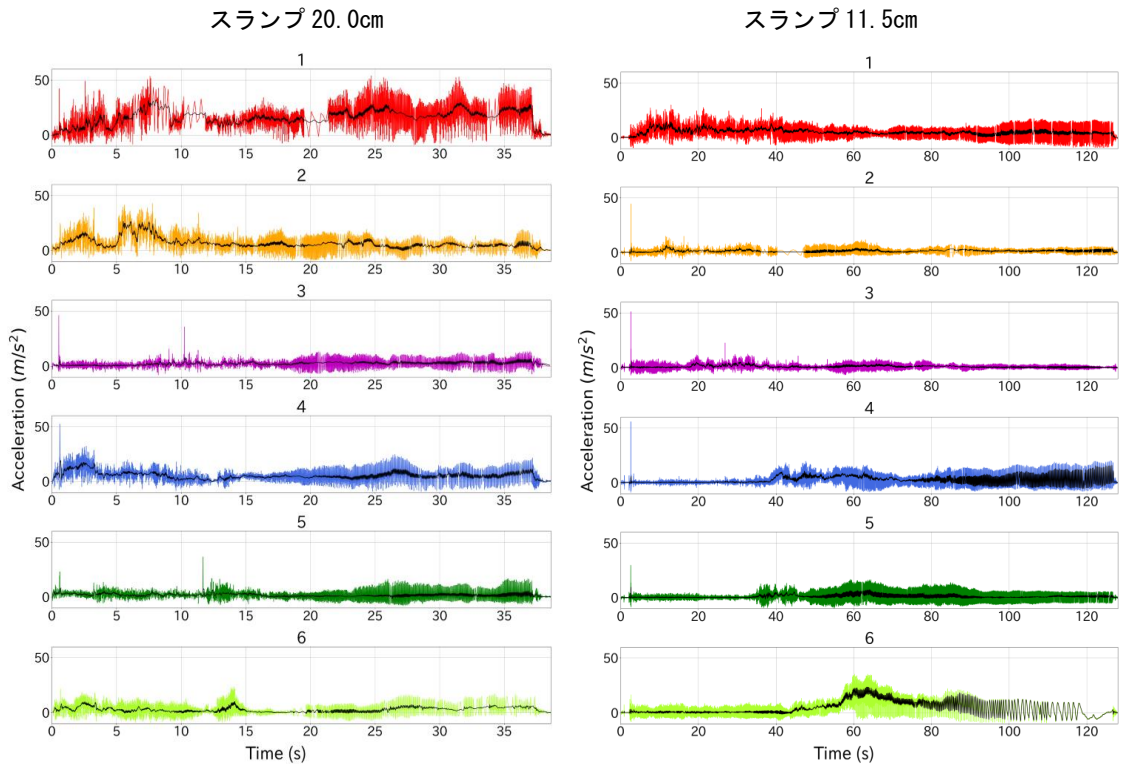


図-6 棒状バイブレータの出力 70V の初期充填時の加速度の時系列データの一例

100V と 70V による違いはほとんどなかった。

本来は、各無線タグにコンクリートが接触する時間を確定しその時刻からの振動計測時間にすべきである。しかしながら、その時刻を確定することが困難であった。そのため、全振動計測時間とした。

4.3 初期充填時の加速度の距離減衰

図-7に、スランプごとの6つの無線タグの加速度の平均値を示す。各棒グラフの垂直の直線は標準偏差を意味する。棒状バイブレータの出力 100V と 70V で、平均加速度の軸の大きさが異なる。スランプに関係なく、加速度は無線タグ 1 から 2 で大きく減衰した。しかし、無線タグ 2 から 6 までは減衰の傾向が顕著ではなかった。

ただし、出力 100V のスランプ 2.0cm および出力 70V のスランプ 4.0cm では、平均加速度が非常に小さくなった。

た。全振動計測時間 180s のため加速度が発生していない時間も考慮しているためである。無線タグがコンクリートに接触した時刻からの実振動計測時間を考慮できれば全計測時間が短くなり平均加速度はもう少し大きくなると思われる。

4.4 初期充填完了後の加速度の距離減衰

初期充填完了後の振動締め実験によって得られた加速度の時系列データに関しても、移動平均による平均化を行い、加速度の平均値と標準偏差を求めた。振動計測時間はスランプの大きさに関係なく 90s で一定とした。

図-8に、スランプごとの6つの無線タグの加速度の平均値と標準偏差を示す。出力 100V と 70V で、平均加速度の軸の大きさが異なる。初期充填完了後も、初期充填時とほぼ同様な傾向が得られた。スランプに関係なく、

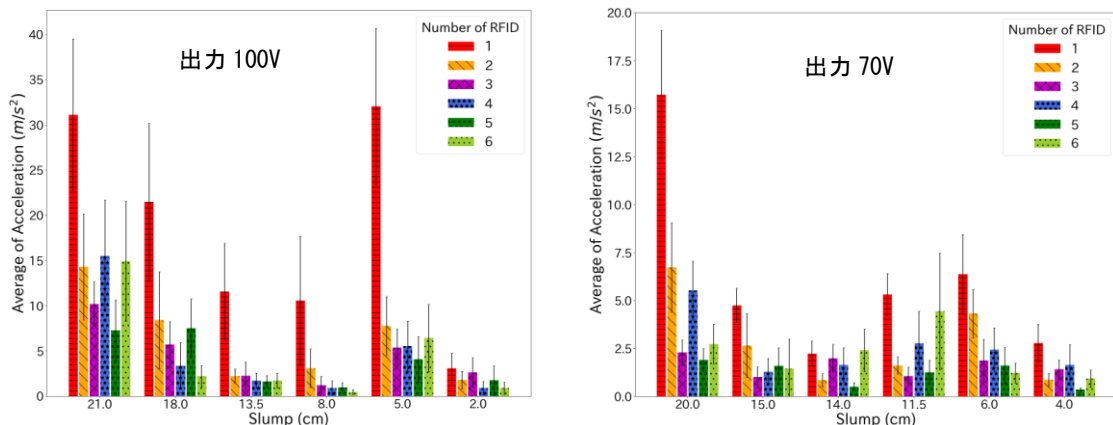
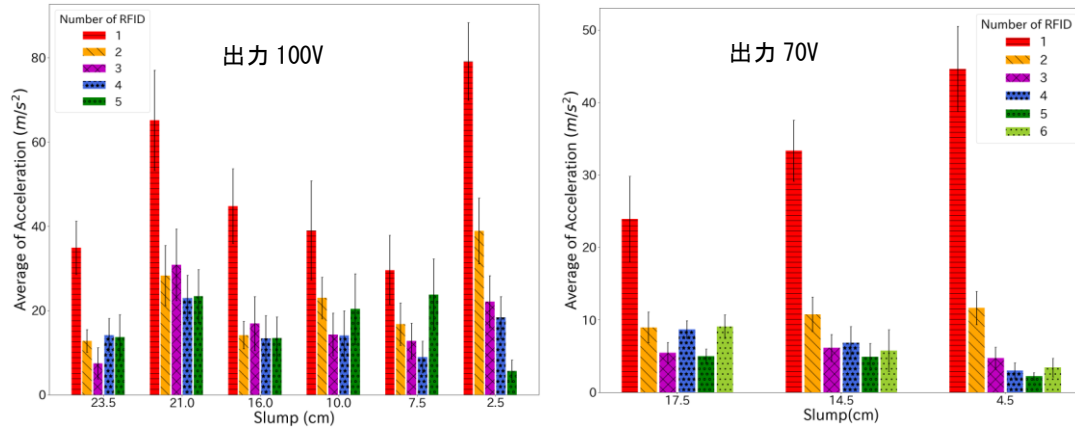


図-7 初期充填時における無線タグの加速度の平均値とスランプの関係



図－8 初期充填完了後における無線タグの加速度の平均値とスランプの関係

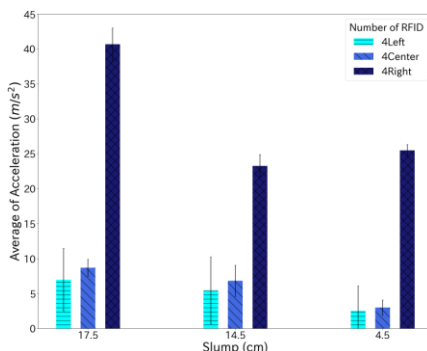
無線タグ 1 から 2 で大きく減衰しているが、無線タグ 2 から 6 までの距離減衰は大きくなかった。初期充填が完了したあとも棒状パイプの距離減衰や伝播の距離等の振動特性は大きく変化しなかった。振動計測時間が一定のため、最小スランプでも極端に平均加速度が小さくなることはなかった。

4.2 から 4.4 の結果から、少なくともパイプの振動源から 50cm までは振動波は伝播していると判断できた。また、計測時間が最小の場合でも 40 秒間である。少なくとも最大加速度が伝播する区間として 15 秒間は材料分離することなく伝播すると判断できた。したがって、現行の示方書の条文中に記載されている“挿入間隔が 50cm 以下、挿入時間 5～15 秒”という数値は妥当であると考えられる。

4.5 流動路 B 室の側面からの振動波の反射の影響

今回の計測方法の妥当性の検討として、流動路 B 室の側面からの振動波の反射の影響について計測した。

図－9 に、流動路 B 室の側面と中央の無線タグの加速度の違いを示す。棒状パイプの出力は 70V である。右側の無線タグの加速度が異常に大きかった。左側や中心の無線タグよりも右側の無線タグの鉄筋への固定位置が強固であったことによる計測方法の影響もあるが、振動波の伝播が流動路断面に対して一様でなく左右で不均一であると思われる。不均一になる原因としては、側面



図－9 左右の壁面と中央の加速度の相違

からの振動波の影響があると考えられる。

本研究で開発した改造 L 型フロー試験装置による距離減衰の定量的評価に関しては、寸法効果の影響を検討する必要がある。しかしながら、実験室規模で、棒状パイプの距離減衰を定量的に評価できる可能性を示すことができたと思われる。

5. 結論

有スランプコンクリートの振動締めを対象に供給側の A 室を改造した L 型フロー試験装置を試作した。コンクリートの振動締め実験から無線タグを用いて流動部の B 室の任意の位置の加速度の時系列データから距離減衰を定量的に評価することができた。振動計測時間の決定方法や、壁面からの反射の影響等の課題はあるものの、本研究の範囲内では、棒状パイプの挿入間隔や挿入時間に関する示方書の規定は妥当であるということが明らかになった。

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ました。付記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会編：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
- 2) 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.1，718-723，2023.7
- 3) 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から伝播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.1，766-771，2022.7