

模擬型枠を用いた締固め途中においてインナーバイブレータから フレッシュコンクリートに伝達される加速度の計測

池澤壮太*1 橋本親典*2 山地功二*3 渡邊健*2

*1 東京工業大学 環境・社会理工学院博士前期課程1年(〒152-8550 東京都目黒区大岡山2丁目12-1)

*2 徳島大学 大学院社会産業理工学研究部(〒770-8506 徳島県徳島市南常三島2丁目1番地)

*3 徳島大学 大学院先端技術科学教育部博士後期課程2年(〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2丁目1番地)

要旨：従来、フレッシュコンクリート内部の加速度の伝播状況に関する既往の研究の多くは、充填後の試料内部または型枠外部から計測するものが多く、締固め途中の流動中のフレッシュコンクリートの加速度を計測した事例は少なかった。本研究では、実現現場を想定した締固め途中のフレッシュコンクリート内部の加速度を計測した。本実験で開発した計測システムで、コンクリート内部に伝播する加速度を計測し、距離による加速度減衰は大きい、鉄筋間隙による加速度減衰は小さいことを定量的に把握できた。また、インナーバイブレータからコンクリートに伝播される加速度は5~20cm程度のスランプには依存しないことが明らかになった。

キーワード：フレッシュコンクリート、加速度、模擬型枠、センサ、インナーバイブレータ

1. はじめに

締固め作業は、フレッシュコンクリートの施工の中で大変重要な工程の1つである。にもかかわらず、コンクリート標準示方書施工編の施工標準においても、「7.5 締固め」の条文は、定量的表現ではなく、定性的表現で記載されているのが現状である。締固めに要する締固めエネルギーや伝播される加速度等の値を用いて定量的に記載されるべきである。定性的表現の域から脱することができない理由の1つに、これまで施工におけるフレッシュコンクリートの締固め時の加速度挙動の計測は、型枠の外側からが大半¹⁾であることが挙げられる。振動締固めによって型枠内に流動していく過程をフレッシュコンクリート内部から観察・記録するような技術あるいは研究手法は数値解析²⁾以外では皆無である。この課題を解決するためには、締固め途中におけるフレッシュコンクリートの挙動を対象にした研究が必要である。本研究では、近年のITやIoTといったテクノロジーを導入して、この課題をブレークスルーすることを試みた。

著者らは、Wi-Fi環境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た遠隔でかつ同時多点計測を可能にした加速度計測システムを新たに開発した³⁾。

本研究では、この加速度計測システムの有用性を確

認するために、水媒質を伝播する内部振動機の振動をこの加速度計測システムを使って計測できることを確認した。

次に、2次製品工場用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試み、有用性を確認した。その結果、模擬型枠内におけるかぶりコンクリートに伝搬される加速度の大きさの分布を計測することができた。

2. 実験方法

2.1 使用材料・コンクリートの配合

コンクリートの配合をTable 1、使用材料の物性値をTable 2に示す。細骨材は、粗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2次製品工場に使用している配合である。なお、設計基準強度は35.0N/mm²、配合強度は38.9N/mm²となっている。工場製品用の配合であるため、Non-AEコンクリートである。配合設計上の空気量は3%である。

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18cmであり、スランプロスさせて、実験を行った。よって、細骨材率は一定であり、スランプの

Table 1 Mixture proportion of concrete used

Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	Unit quantity(kg/m ³)			
				W	C	S	G
10±2.5	3	41.5	43	174	420	743	989

1 変化は、セメントの水和反応を利用した。
 2 **2.2 加速度計測装置**
 3 加速度の測定には Photo. 1 に示すシングルボードコ
 4 ンピュータを用いて作製された加速度計測装置を用い
 5 た。Table 3 に加速度センサの概要を示す。シングルボ
 6 ードコンピュータにコードを通じて加速度センサを組
 7 み込み、加速度計測装置とした。つまり、後述する“セ
 8 ンサ設置位置”とはシングルボードコンピュータから
 9 コードで接続されているセンサを設置している位置の
 10 ことである。
 11 加速度計測装置は、コンピュータの遠隔操作方法の
 12 1 つである SSH 接続を市販のルーターによってネット
 13 ワークを構築することで使用した。SSH 接続を用いて
 14 パソコンとの接続を行い、測定開始コマンド送信や測
 15 定終了コマンド送信、計測データの採取を行った。また
 16 た、センサ部分には 2 液混合エポキシ接着剤を用いて
 17 防水・防汚加工を施し、加速度計測装置の電源として
 18 モバイルバッテリーを使用した。
 19 なお、本加速度計測装置で得られる加速度のデータ
 20 処理等の詳細な説明は参考文献 3) で、すでに発表して
 21 おり、本論文では省略した。本論文で定量化した加速

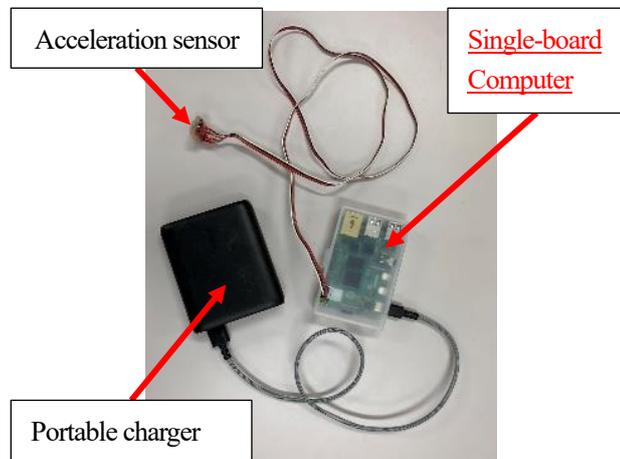


Photo. 1 Device of measurement for acceleration of fresh concrete flowing in compaction

Table 3 Summary of the capacitance-type acceleration sensor used

Model	ADXL345
Range of measurement(G)	±16G
Data rate(Hz)	800Hz
Power consumption(Measurement)(W)	57.5μW
Power consumption(Stand by)(W)	0.25μW
Usable temperature(°C)	-55°C~+105°C

Table 2 Physical properties of materials used

Classification	Product name	Density (g/cm ³)	fineness modulus
Cement	Ordinary Portland Cement	3.16	-
Fine aggregate	crushed sand(coarse)	2.57	3
	blast-furnace slag fine aggregate BFS 5	2.77	2.6
Coarse aggregate	Crushed stone	2.58	6.6
Admixture	high range water reducing admixtures	1.05	-

22 度は、3 軸方向の加速度の 2 乗和の平方根から重力加
 23 速度を差し引いた加速度である。

24 **2.3 模擬型枠締め試験**

25 模擬型枠の全体像を Photo. 2 に示す。インナーバイ
 26 ブレータを Photo. 3 に示す。インナーバイブレータの
 27 規格を Table 4 に示す。

28 模擬型枠は、高密度配筋の構造物を模擬した充填容
 29 器である。Fig. 1 にセンサの設置位置を示す。Table 5 に
 30 各センサの X、Y、Z 位置を示す。加速度計測装置は、

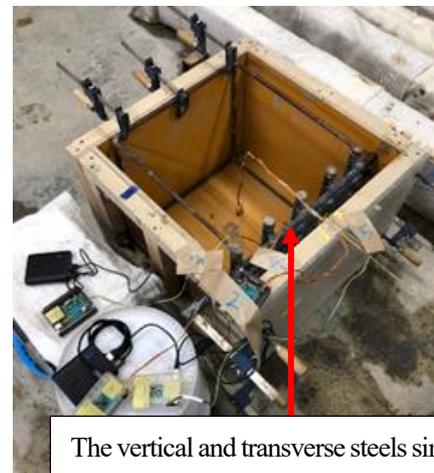


Photo. 2 General view of the mock-up form used

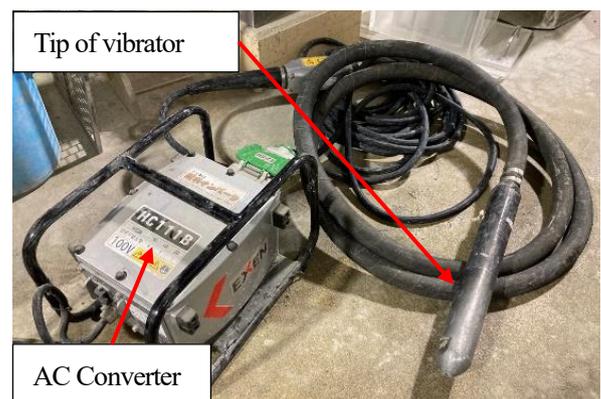


Photo. 3 General view of onsite-vibrator and converter used

Table 4 Summary of onsite vibrator used

Model	Output(W)	Voltage(V)	Current(A)	Periodicity(Hz)	Frequency(Hz)
HBM50VA	400	48	9	200/240	200/240

Length(mm)	Vibration part (Diameter×Length)(mm)	external hose (Diameter×Length)(mm)	Mass(kg)
6539	52×385	36×6000	16.1

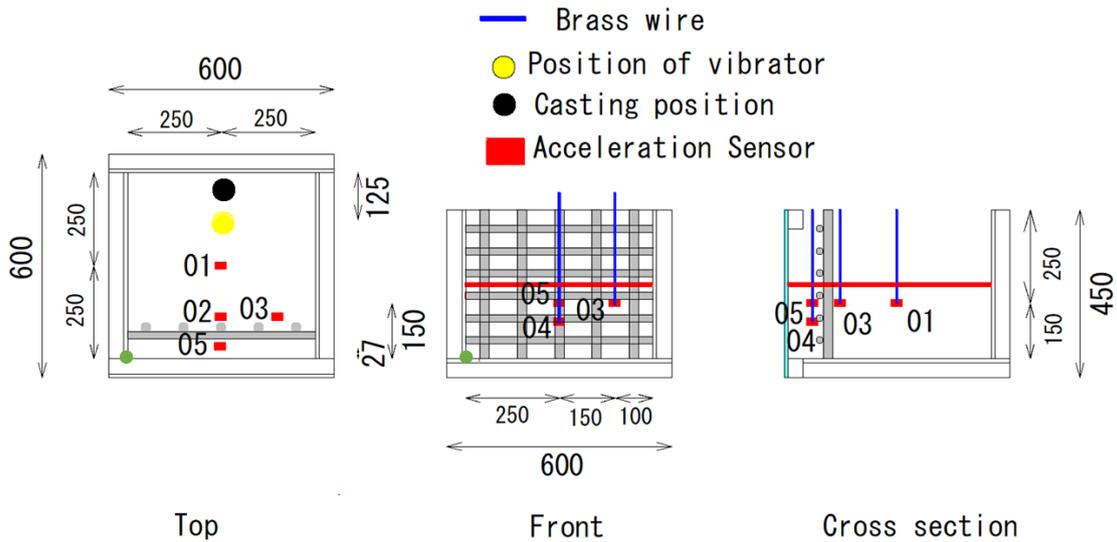


Fig. 1 Positions of sensors in mock up form before the experiment of compaction

Table 5 Three-dimensional position (X, Y, Z) of each sensor before the experiment of compaction

No.	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
01	250	250	150
02	250	113	150
03	400	113	150
04	250	27	100
05	250	27	150

※Green point on Fig.1 is start point.

1 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、順次作製した。なお、センサの番号は01、02、03、04、05となっている。本実験ではミキサー車から構造物に打設することを想定し、漏斗を通して模擬型枠内にコンクリートを打ち込んだ。容量は約60lとした。その後、インナーバイブレータ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。センサは、流動するコンクリート中

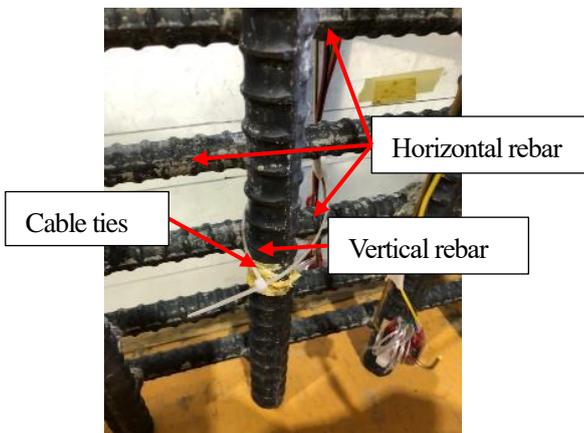


Photo. 4 General view of sensor fixed by cable ties

11 を動くことになる。動くというよりは流されるという
12 表現に近い。このため、後述する真鍮を用いて流され
13 る範囲をある程度固定した。センサ自体の流動は発生
14 するが、センサの角度等は大きく変化していなかった
15 ため、計測はできていたと考えられる。さらに、セン
16 サ番号04とセンサ番号05は、加速度計直上の真鍮を
17 鉄筋にプラスチック製の結束バンドで括り付けた
18 (photo.4参照)。

19 2.4 フレーム外観

20 Photo.5に実験で使用したフレームの外観を示す。模
21 擬型枠自体を介して伝わったインナーバイブレータの
22 振動をセンサが計測しないようにするため、フレーム
23 を導入した。フレームは、垂直部材、水平部材および
24 足場から構成される。

25 Photo.6に示すように真鍮製の棒にセンサを括りつ
26 けたものをフレームに設置し、模擬型枠上から模擬型
27 枠内に垂らすようにして実験を行った。

28 2.5 実験に用いたコンクリートのフレッシュ性状

29 Table 6に締固め実験に供したフレッシュコンクリー

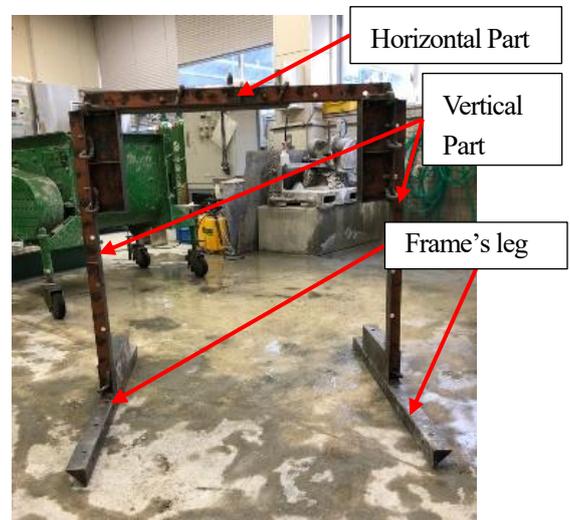


Photo. 5 General view of the frame to fix the position of the sensors

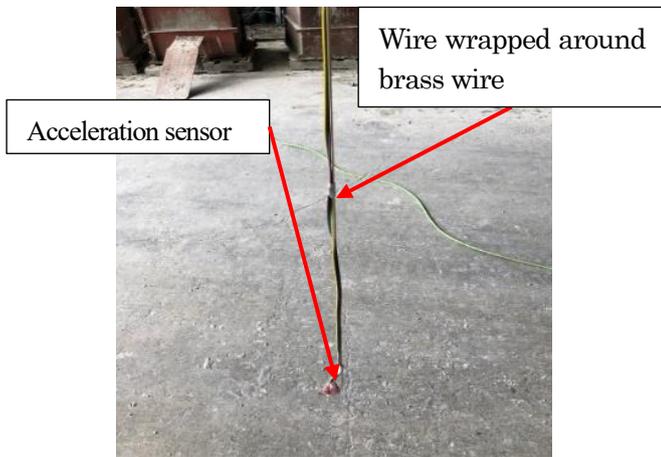


Photo. 6 Acceleration sensor strapped to brass wire

1 トの性状を一覧表にして記す。
 2 最初に 400ℓ ほどのコンクリートを練り混ぜ、スラン
 3 プ試験等のフレッシュ性状の試験を行い、締固め実験
 4 を実施し、模擬型枠内のコンクリートを廃棄した。練
 5 り舟に残ったコンクリートを用いて、2 回目のフレッ
 6 シュ性状の試験でスランプを確認し、締固め実験を実
 7 施した。これを繰り返し行った。その結果、コンクリ
 8 ートの練混ぜ直後は、スランプ 18cm であったが、締固
 9 め実験を繰り返すことによって、スランプが 5cm まで
 10 低下した。その後、高性能減水剤を添加することによ
 11 って、スランプを 23cm まで増加させて、締固め実験を
 12 行った。

13 3. 実験結果

14 なお、本論文では紙面の都合によって、締固め実験
 15 1 のスランプ 18cm、締固め実験 2 のスランプ 12cm お
 16 よび締固め実験 3 のスランプ 9cm の加速度計測のデー
 17 タについて次章以降で説明する。

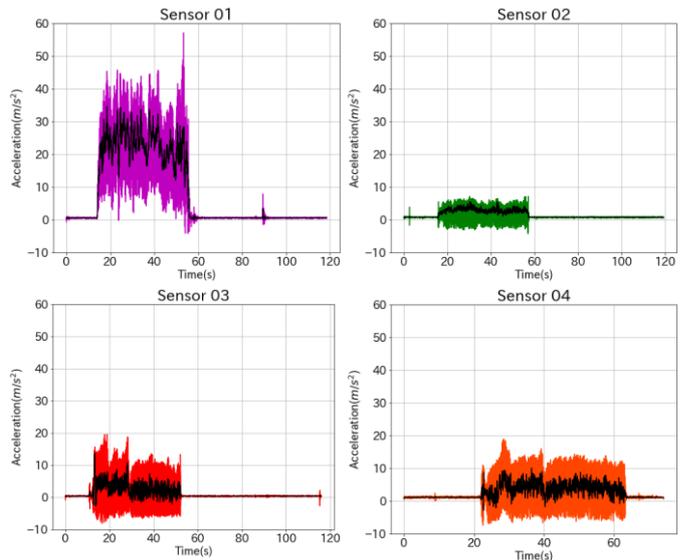
18 3. 実験結果

19 Table 6 Result of fresh properties for each the
 20 experiment of compaction

No.	Slump(cm)	Air(%)	Concrete temperature(°C)
1	18	2.7	13.8
2	12	3	14.6
3	9	3	13.6
4	7	3	16
5	5	3	16.2
6	23	2.3	17.1

21 Table 7 Summary of bar vibrator used

Model	Length(mm)	Weight(kg)	Output(W)	Current(A)	Vibration part/ Diameter×Length(mm)
D28D	784	5	280	5	28×475



22 Fig. 2 Result of accelerations propagated in
 23 water by onsite vibrator

24 のインナーバイブレータと比較して、棒バイブレータ
 25 の出力は 280W であり小さい。

26 3. 1 インナーバイブレータによる水媒質を伝搬す 27 る加速度の計測

28 Fig. 2 にインナーバイブレータを用いて行った加速
 29 度計測の結果を示す。

30 計測時間間隔は、100Hz である。センサ番号は 01、
 31 02、03、04、05 となっており、Fig.1 と対応している。
 32 05 については、センサ故障のため計測出来なかった。
 33 各グラフの黒実線は 10 点毎の移動平均である。加速度
 34 は、締固め途中のコンクリートの内部で流されないた
 35 め、加振開始後から概ね一定の定常状態であった。バ
 36 イブレータに 1 番近いセンサ番号 01 の加速度が最も
 37 大きい。センサ番号 01 とセンサ番号 04 を比較すると
 38 水媒質中を伝搬する加速度が減衰している様子を定量的
 39 的に捉えることができた。

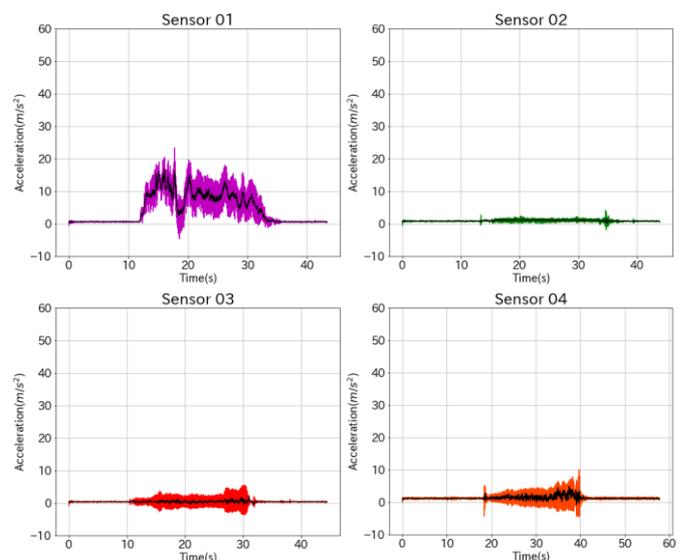


Fig. 3 Result of accelerations propagated in
 water by bar vibrator

3.2 棒バイブレータによる水媒質を伝搬する加速度計測の結果

Fig. 3 に棒バイブレータを用いて行った実験の結果を示す。Fig. 2 と同様に、加速度は加振開始後から概ね一定の定常状態となっている。インナーバイブレータを用いた加速度計測の実験結果と比較すると、加速度の大きさが 1/3 程度である。これは、そもそものバイブレータ自身の加速度の大きさによともと考えられる。さらに、センサごとの大小関係がインナーバイブレータと同様であることが確認された。

以上の実験結果から、水媒質を伝搬する加速度を計測することが確認できると判断した。

なお、センサ番号 02 は、振動機の種類に関係なく加速度の値が 4 つのセンサの中でもっとも小さい。エポキシ樹脂による防水処理をしたときにセンサ自体に不

具合が起きている可能性がある。以後の考察では、センサ番号 02 のデータは議論しないこととした。

3.3 スランプ 18cm における加速度計測の結果

Fig. 4 にスランプ 18cm における実験結果を示す。センサ番号は、01、02、03、04、05 となっており、Table1 と対応している。水媒質の計測データと同様に、各グラフの黒実線は 10 点毎の移動平均である。インナーバイブレータに 1 番近いセンサ番号 01 のグラフでは、加速度が 250m/s^2 を超える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出来ていると考える。なお、センサ番号 03 のグラフに一部途切れが見られるが、計測時のエ

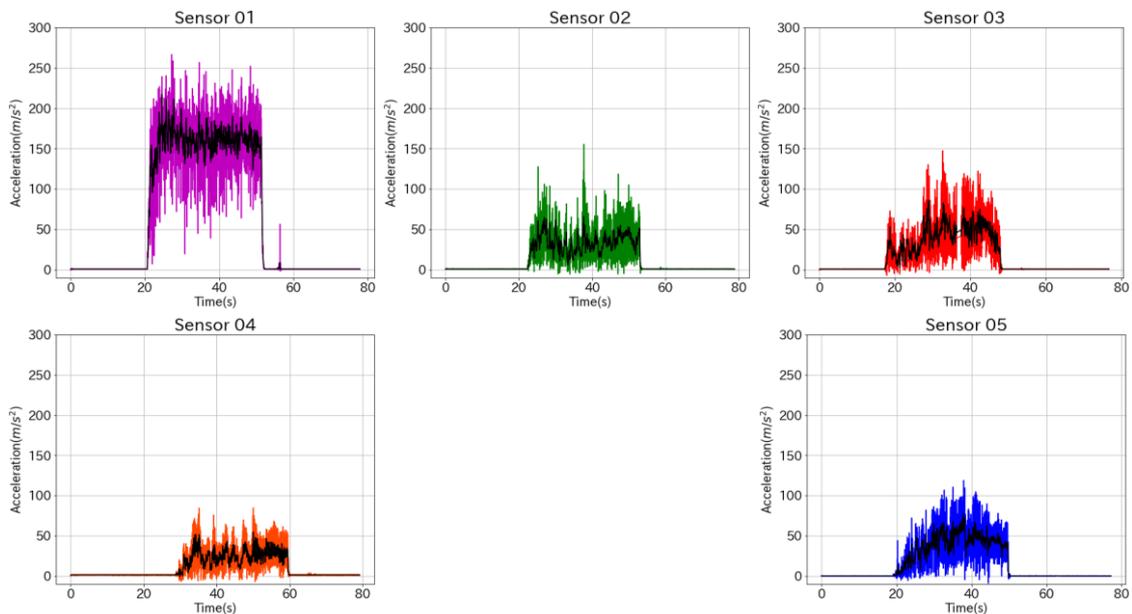


Fig. 4 Result of accelerations measured in the experiment of compaction at slump of 18cm

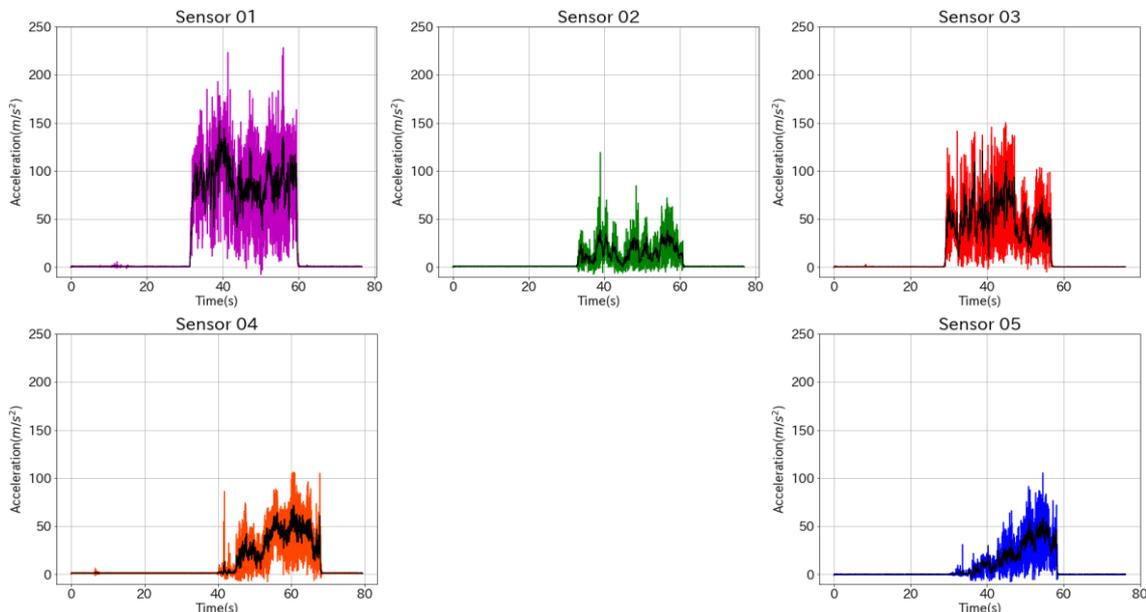


Fig. 5 Result of accelerations measured in the experiment of compaction at slump of 12cm

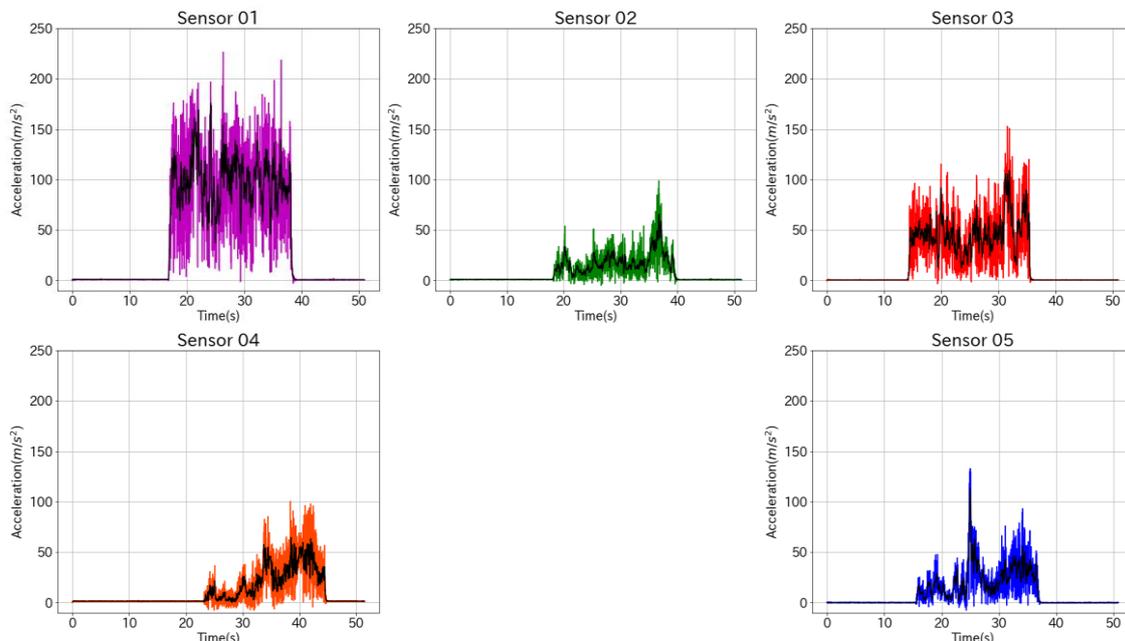


Fig. 6 Result of accelerations measured in the experiment of compaction at slump of 9cm

1 ラーと考えられる。

2 3.4 スランプ 12cm における加速度計測の結果

3 Fig. 5 にスランプ 12cm における実験結果を示す。
 4 スランプが 12cm の場合においても、センサ番号 01
 5 とセンサ番号 03 の位置では伝搬する加速度が 50%程
 6 度に減衰していることが確認できた。一方で、バイブ
 7 レータ終了時のセンサの位置は元々設置した位置から
 8 コンクリートの流動方向へ流されているのを確認した。
 9 特に、バイブレータの直線上にあるセンサはコンクリ
 10 ートの流動の影響を受けやすく、計測に影響を及ぼし
 11 ていると考える。

12 3.5 スランプ 9cm における加速度計測の結果

13 Fig. 6 にスランプ 9cm における実験結果を示す。
 14 スランプが 9cm の場合においても、センサ番号 01 と
 15 センサ番号 03 の位置では伝搬する加速度が 50%程度
 16 に減衰していることが確認できた。また、一部のセン
 17 サでは、コンクリートの流動の影響を受けやすく、計
 18 測への影響が発生していると考えられる。

19 3.6 スランプと計測位置における平均加速度の関係

20 加速度の時系列データの統計値として、5 か所のセン
 21 サ別に、加振開始から加振終了時の加速度の 10 点ご
 22 との移動平均を取った数値の平均値と偏差を求めた。
 23 つまり、各計測結果に表示されている黒い実線の値の
 24 平均と偏差を取った。なお、センサごとに測定開始コ
 25 マンドを送信しているため、一定区間はスランプ毎で
 26 数十秒間程度異なっている。

27 Table 8 にセンサ番号別に、締固め実験の加速度の統
 28 計値とスランプの関係を示す。インナーバイブレータ
 29 の 1 番近くにあるセンサ番号 01 が 107.7cm/s² と最も大
 30 きく、鉄筋かごの左部に位置するセンサ番号 03 が
 31 41.5cm/s² とセンサ番号 05 が 23.0cm/s² と小さくなる。

32 締固め作業時にフレッシュコンクリート自体に伝搬す
 33 る加速度の減衰を定量的に捉えることが出来ている。
 34 しかし、一部のセンサにおいてはコンクリートの流動
 35 の影響による計測への影響が発生していると考えられ、
 36 一部のセンサの値については検討が必要である。

Table 8 Comparison on statistics indexes of acceleration measured for each the experiment of compaction

No.	Slump(cm)	Time section (s)	Number of data	Average (cm/s ²)	Average of all slump (cm/s ²)	S.D. (cm/s ²)	C.V. (%)
01	23	21.46-34.36	720	85.34	107.7	33.18	38.88
	18	20.20-52.36	1790	152.04		36.56	24.05
	12	31.36-60.23	1610	86.34		23.93	27.72
	9	16.78-38.89	1230	95.1		28.89	30.38
	7	12.49-34.03	1200	148.03		42.17	28.49
	5	11.00-40.13	1620	79.26		23.96	30.23
02	23	22.51-35.08	610	48.04	25.7	10.9	22.69
	18	22.27-53.82	1530	32.13		12.39	38.56
	12	32.61-61.05	1380	15.96		8.62	54.01
	9	18.16-40.00	1060	17.89		10.44	58.36
	7	14.22-34.81	100	19.35		11.2	57.88
	5	12.17-41.46	1420	20.57		10.9	52.99
03	23	19.66-32.06	690	65.45	41.5	25.74	39.33
	18	17.12-48.83	1700	38.42		18.36	47.79
	12	28.66-57.77	1620	48.74		21.06	43.21
	9	14.30-36.03	1210	45.34		18.76	41.38
	7	8.890-29.39	1140	28.05		14.94	53.26
	5	7.994-37.11	1620	22.89		13.29	58.06
04	23	28.32-41.18	1250	34.78	28.4	22.22	63.89
	18	28.3-60.0	3200	23.6		10.5	44.49
	12	40.36-68.16	2770	30.44		18.18	59.72
	9	22.97-44.87	2090	22.43		16.42	73.21
	7	20.49-40.75	1940	36.29		30.7	84.60
	5	17.94-46.54	2810	22.94		17.26	75.24
05	23	21.33-33.37	670	21.76	23.0	18.15	83.41
	18	19.17-50.08	1720	37.62		16.57	44.05
	12	29.96-58.51	1590	18.45		16	86.72
	9	15.65-37.10	1195	22.6		15.74	69.65
	7	10.32-31.36	1170	25.13		19.17	76.28
	5	9.627-38.22	1590	12.52		9.041	72.21

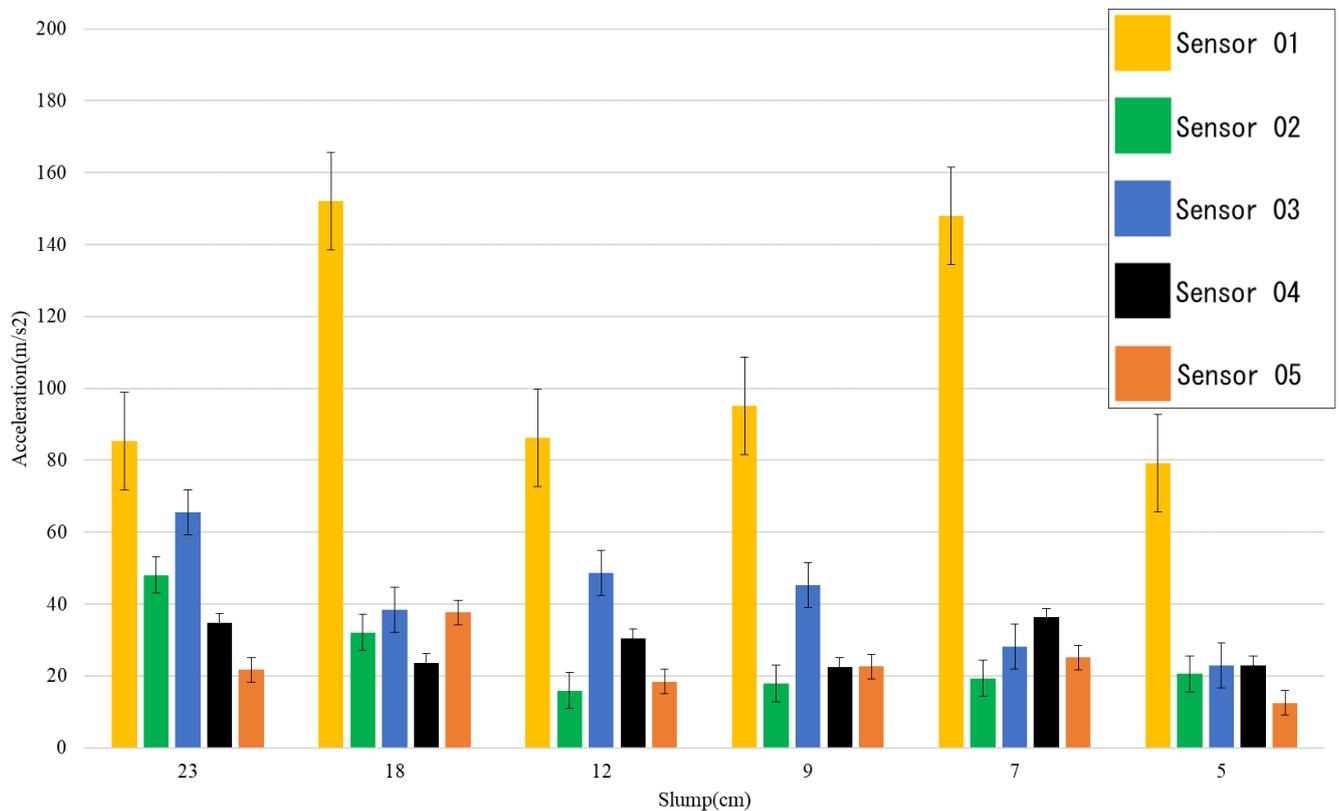


Fig. 7 Relationship the between the mean of acceleration measured and the value of slump measured

1 インナーバイブレータに1番近いセンサ番号01と
 2 センサ番号03を比較すると流動の影響もあるが、
 3 140mm程度の間で伝搬する平均加速度はセンサ番号
 4 01に比べて40%程度までに減衰していることが確認さ
 5 れた。

6 また、鉄筋かごの内側であるセンサ番号03とセンサ
 7 番号05の平均加速度を比較すると、加速度は概ね同じ
 8 であり、鉄筋の有無は加速度の伝搬において影響が少
 9 ないことが確認できる。

10 さらに、Fig.7に示すスランプの平均値に着目すると、
 11 締固め途中のフレッシュコンクリートに伝播する加速
 12 度は、スランプの大きさにあまり影響を受けていない
 13 ように思われる。

14 國府らの研究では、限界加速度と0cm~12cmのスラ
 15 ンプの関係は、反比例になる報告されている⁴⁾。つま
 16 り、締固めに必要な最小の加速度は、スランプが小さ
 17 くなるほど大きくなる。ただし、6cm~12cmのスラン
 18 プの限界加速度はほぼ一定である。これは、硬練りコン
 19 クリートになるほど、加速度が伝播されにくくなる
 20 ことを意味する。一方、梁らの論文⁵⁾における「鉄筋を
 21 埋設した模擬試験体における加速度分布の測定」で求め
 22 られたスランプ15cm、12cmおよび8cmの加速度の分布
 23 形状がほぼ同じという計測の結果が報告されている。この
 24 2つの知見をまとめると、ゼロスランプのような硬練りコン
 25 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
 26 はスランプには依存されないということになる。

27 本研究では、スランプ5cm~23cmを対象としたコンクリ

28 ートである。そのため、スランプには依存しなかったと思
 29 われる。

31 4. まとめ

32 本実験の範囲内で明らかになったこと記す。

33 1)これまでの加速度の計測においては、「型枠外部から」
 34 の計測が多かったが、本実験においては「フレッシュ
 35 コンクリート自体」の加速度計測手法を示すことがで
 36 きた。

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

40 3)締固め途中の流動するフレッシュコンクリート内部
 41 の加速度はスランプにほぼ依存しない。

43 謝辞：

44 本研究の一部は、一般社団法人四国クリエイト協会
 45 の『2021年度建設事業に関する技術開発支援制度』
 46 による助成を受けて実施したものである。ここに付記
 47 し、感謝の意を表します。

49 参考文献

50 1) 山内匡、千賀年浩、野口貴文、北垣亮馬、西島茂行、
 51 山本秀之：型枠に設置したセンサによるコンクリ
 52 ート締固め時の加速度測定に関する実験”、土木学
 53 会第72回年次学術講演会講演概要集、VI部門、
 54 pp.1543-1544、2017.9

- 1 2) 浦野真次、根本浩史、崎原康平：高流動コンクリー
2 トの充てん性評価への流動解析手法の適用に関す
3 る研究、土木学会論文集 E2、Vol.68、No.1、pp.38-
4 48、2012.
- 5 3) 藤原京介、橋本親典、山地功二、渡邊健：加振ボッ
6 クス充填装置内を流動するフレッシュコンクリー
7 トに棒バイブレータから伝搬される加速度の計測
8 システムの開発、コンクリート工学年次論文集、
9 Vol.44、No.1、2022.
- 10 4) 國府勝郎、早川健司、上野敦、牛島栄：硬練りコン
11 クリートの締固め性評価について、JCI コンクリー
12 トの品質評価試験方法に関するシンポジウム論文
13 集、pp.117-124、1998.12
- 14 5) 梁俊、丸屋剛、坂本淳、松元淳一、下村泰造、滝沢
15 正徳：鉄筋間隙を通過するコンクリートにおける
16 締固めエネルギーに基づいた締固め性に関する研
17 究、土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)、
18 Vol.75、No.2、pp.142-156、2019.

MEASUREMENT OF ACCELERATION PROPAGATED INTO FRESH CONCRETE DURING PLACING IN THE MOCK-UP FORM USING ONSITE VIBRATOR

Sodai IKEZAWA*1、 Chikanori HASHIMOTO*2、 Noritsugu YAMAJI*3 and Takeshi WATANABE*2

*1 TOKYO INSTITUTE OF TECHNOLOGY, School of Environmental and Social Science and Engineering, 1st year of Master's program (2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, Japan)

*2 TOKUSHIMA UNIVERSITY, Graduate School of Technology, Industrial and Social Science (2-1 Minami Jousanjima, Tokushima-shi Tokushima 770-8506, Japan)

*3 TOKUSHIMA UNIVERSITY, School of Advanced Technology and Science, 2nd year of Doctor's program (2-1 Minami Jousanjima, Tokushima-shi Tokushima 770-8506, Japan)

ABSTRACT: Most of the previous studies on the propagation of acceleration inside fresh concrete have measured the acceleration in the filled sample or from outside the formwork, and there have been few cases where the acceleration of fresh concrete in flow during the compaction process has been measured. In this study, the acceleration on fresh concrete during compaction in mock up form was measured. With the measurement system developed in this experiment, the acceleration propagating inside the fresh concrete was able to measure on several places of the position at the same time and the existence of acceleration damping could be quantitatively determined. It was also found that the acceleration propagated into the concrete from the onsite vibrator was independent of the value of slump.

KEY WORDS: Fresh concrete, Acceleration, Mock-up formwork, Sensor, Onsite vibrator