

フレッシュコンクリートに伝搬される加速度を静電容量式小型加速度センサにより直接計測する手法の開発

橋本 親典(徳島大学大学院社会産業理工学研究部社会基盤デザイン系)

山地 功二(徳島大学大学院先端技術科学教育部博士後期課程2年)

渡辺 健(徳島大学大学院社会産業理工学研究部社会基盤デザイン系)

石丸 啓輔(徳島大学技術支援部常三島技術部門)

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。しかしながら、コンクリート標準示方書施工編の施工標準の「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。多くの研究者や技術者が、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た定量的評価を試みてきている。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。さらに、流動中のコンクリートの加速度を計測するためには、高額な加速度計を用いて有線で動ひずみ計や記録装置を使用しなければならないことが挙げられる。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、静電容量式小型加速度センサを用いて、Wi-Fi や Raspberry Pi や無線 IC タグといった ICT・IoT に関する技術を用い、安価でかつ無線で、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た。なお、本論文は、2つの学会発表[3],[4]の内容を取りまとめたものである。

論文は2つの報告から構成されている。

最初の報告は、写真-1に示す Raspberry Pi と加速度センサを用いて、小型模擬型枠内の締固め過程におけるフレッシュコンクリート中に伝播する加速度の計測を試みた。通信は、Wi-Fi 環境で行う。

次の報告は、写真-2に示す小型加速度センサが内蔵された無線 IC タグを用いて、加振ボックス形試験装置内を流動するフレッシュコンクリート中の加速度の計測を行い、先の Wi-Fi による無線通信で得られる加速度波形との比較を試みた。先の Raspberry Pi は、有線であるが、この無線 IC タグは、完全無線となる。

なお、2つの計測システムで用いている静電容量型加速度センサ自体は同じ製品である。

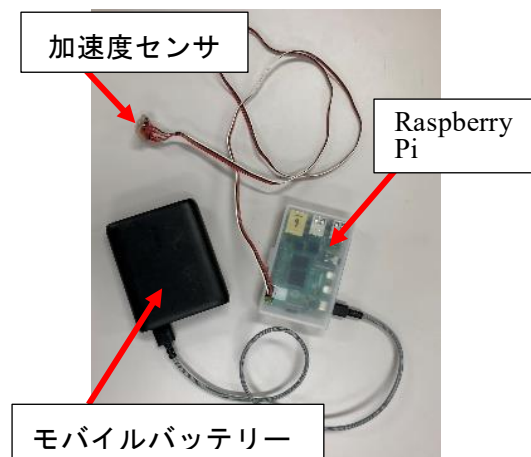


写真-1 Raspberry Pi と小型加速度センサによる無線加速度計測システム



写真-2 無線 IC タグの外観(左)とパソコンに取り付ける送受信機(右)

2. Wi-Fi 環境と Raspberry Pi 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計測システムによる模擬型枠内の締固め途中の加速度計測

2. 1 実験概要

コンクリートの配合を表-1, 使用材料の物性値を表-2に示す. 配合は, コンクリート2次製品工場の配合であった. スランプの基準は10cmとなっているが, 実際には15cmのスランプになった. コンクリートをスランプロスさせることによってスランプを変化させて実験を行った.

表-1 コンクリートの配合

空気量 (%)	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単量 (kg/m ³)			
					W	C	S	G
3	20	10±2.5	41.5	43	174	420	743	989

2. 2 計測装置およびフレーム

計測装置は, 前述した写真-1に示す Raspberry Pi と加速度センサからなる. Raspberry Pi は, 従来の計測装置の動ひずみ計, アンプおよび記録装置を複合させたものであり, かつ, 送信装置を有する. なお, Raspberry Pi と加速度センサは有線である[5].

表-2 実験に使用した使用材料の物性値

種類	品名	密度 (g/cm ³)	粗粒率
セメント	普通ポルトランドセメント	3.16	—
	砕砂(粗)	2.57	3
細骨材	高炉スラグ細骨材 BFS 5	2.77	2.6
	砕石2005	2.58	6.6
粗骨材	—	—	—
混和剤	高性能減水剤	1.05	—

写真-3に実験で使用したフレームの外観を示す. 模擬型枠自体を介して伝わったバイブレータの振動をセンサが計測しないようにするため, フレームを導入した. 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.

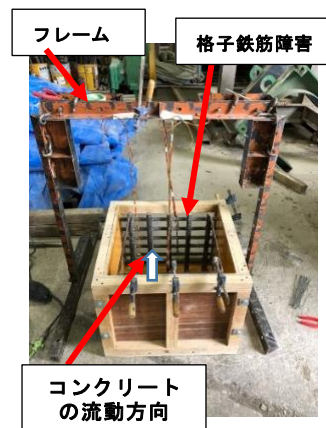


写真-3 模擬型枠外観

2. 3 模擬型枠充填試験

模擬型枠全体を写真-3に示す. 模擬型枠は, 高密度配筋の構造物を模擬した. 純かぶり27mmに主筋とせん断補強筋を模擬した格子状の鉄筋障害を配した. ミキサー車から構造物に打ち込むことを想定し, パイロンを利用して模擬型枠にコンクリートを60ℓ打ち込んだ. 写真-3の手前側にインナーバイブレータを挿入し, フレッシュコンクリートは鉄筋障害を通過してかぶり部に流動する. 模擬型枠内に打ち込んだコンクリートが下端部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.

図-1にセンサの設置位置を示す. なお, センサ番号は01~05の5つである. なお, 04と05は, 水平位置は同じで深さが異なる.

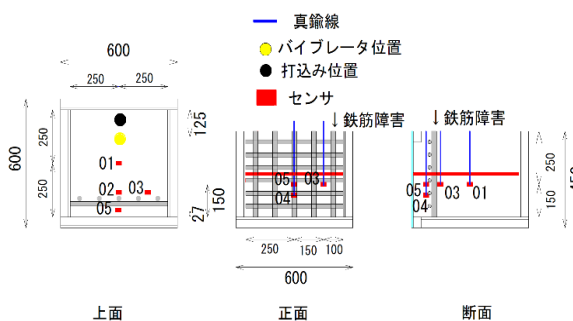


図-1 センサ設置位置

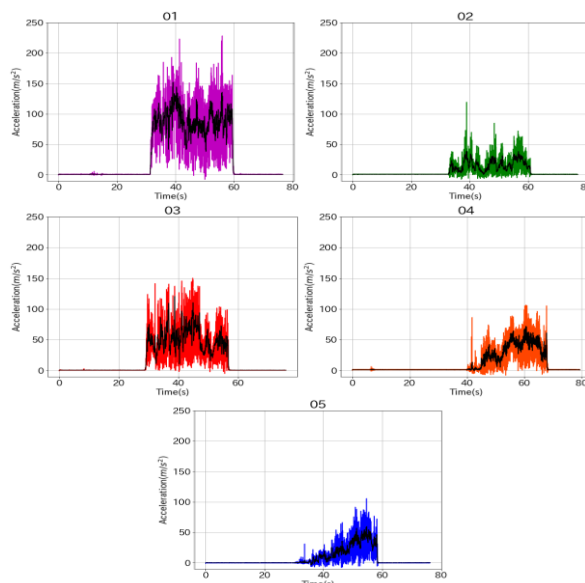


図-2 スランプ12cmにおける実験結果

2. 4 実験結果および考察

表-3に実験に用いたコンクリートの性状を示す。図-2に実験結果の一例として、スランプ12cmの各センサの加速度の時系列データを示す。計測間隔は100Hzである。黒い実線は10点ごとの移動平均を示す。

01（振動機近傍）は150m/s²~200m/s²程度の大きな加速度を示し、次に03（鉄筋左部）の100m/s²~150m/s²程度、04（かぶり下端100mm）の50m/s²~100m/s²程度、05（かぶり下端150mm）の50m/s²~100m/s²、02（鉄筋中央部）の40m/s²~80m/s²と続く。01と04を比較すると、200mm程度の距離で加速度は1/2程度までに減衰した。

かぶり側に配置した04と05の時系列データは、特徴的な“立ち上がり”の挙動を見せ、概ね一定の加速度を示した。一定の加速度を示す挙動は、予備実験でも確認されており「締固めの完了」を示唆するものであると考えられる。

図-3に加速度の10点ごとの移動平均の平均をスランプ別に示す。インナーパイプの近傍の01を除くと、スランプの大きさに関係なく加速度はほぼ一定であった。つまり、かぶり周辺のコンクリートに伝播する加速度は、スランプに依存しなかった。国分らの研究では、限界加速度と0cm~12cmのスランプの関係は、反比例になる報告されている[6]。つまり、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、6cm~12cmのスランプの限界加速度はほぼ一定である。これは、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ことを意味する。一方、梁らの論文[7]における「鉄筋を埋設した模擬試験体における加速度分布の測定」で求められたスランプ15cm、12cmおよび8cmの加速度の分布形状がほぼ同じという計測の結果が報告されている。この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5cm~23cm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。

また、障害鉄筋の前後（振動機側とかぶり側）では、加速度の変化に大きな影響が見られず、締固め作業時の加速度の減衰における「鉄筋の存在」が及ぼす影響は小さかった。

表-3 コンクリートの性状

No.	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°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

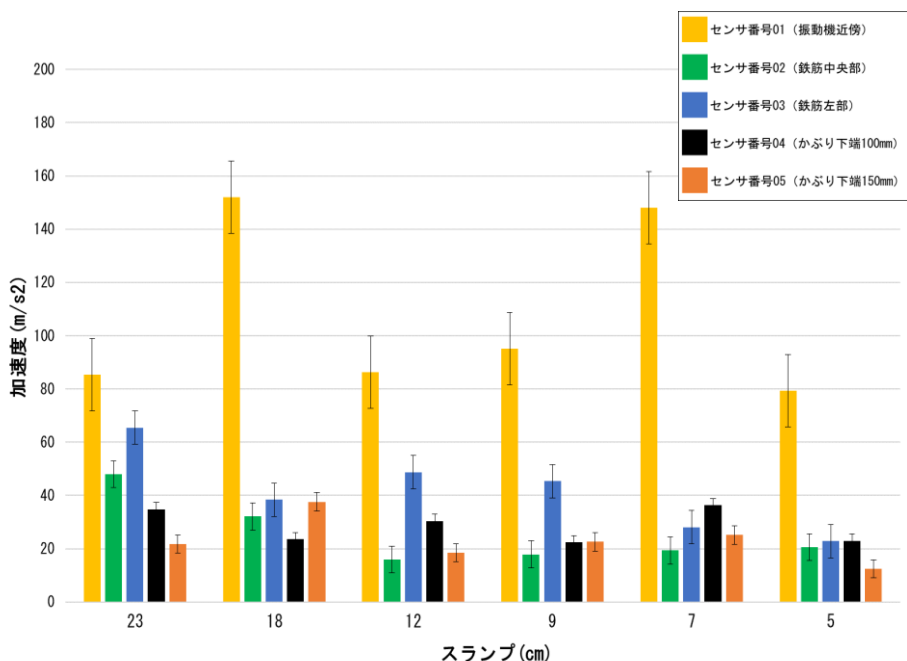


図-3 スランプ別の平均加速度の比較

3. 小型加速度センサを内蔵された無線 IC タグを用いた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伝播する加速度の計測

3.1 使用材料および配合

使用材料を表-4, 配合表を表-5に示す. 水セメント比は47%, 細骨材率は47%とし, 高性能 AE 減水剤の添加量およびスランプロスでスランプの調整を行った. 同一配合で, スランプ 17~19cm の3種類のコンクリートを実験に供した.

表-4 使用材料

種類	品名	密度 (g/cm ³)	粗粒率	産地
セメント	普通ポルトランドセメント	3.16		
細骨材	砕砂	2.58	2.83	兵庫県赤穂市
粗骨材	砕石1505	2.57	6.40	徳島県板野郡板野町大坂字川走
	砕石2010	2.57	7.06	徳島県板野郡板野町大坂字川走
混和剤	高性能AE減水剤	1.03		
	AE剤	1.02		

表-5 配合表

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		
47	47	165	350	823	555 386	16±2.5	4.5±1.5

3.2 無線 IC タグを用いた計測システム

前述した写真-2に示す3軸の加速度センサを搭載した無線 IC タグを使用し, 図-4に無線 IC タグの送受信の概要を示す. ノート PC に送受信機を接続し, 無線にて IC タグへ計測開始・終了のコマンドや計測データの送受信を行う.

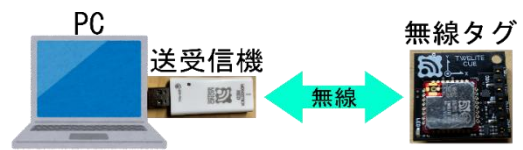


図-4 無線 IC タグを用いた計測の概要

3.3 加振ボックス充填装置および計測方法

図-5に加振ボックス充填装置の外観を示す. 加振ボックス充填装置は, 土木学会規準 (JSCE-F701) で用いられているものである. 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している. 以下に計測手順を示す.

- 1) コンクリートを A 室側に充填する.
- 2) 棒状バイブレータを A 室側へ挿入し, 加振と同時に仕切り版を外し, B 室側へコンクリートを流動させる.
- 3) 赤線で示す 300mm ラインに到達した時点で計測を終了する.

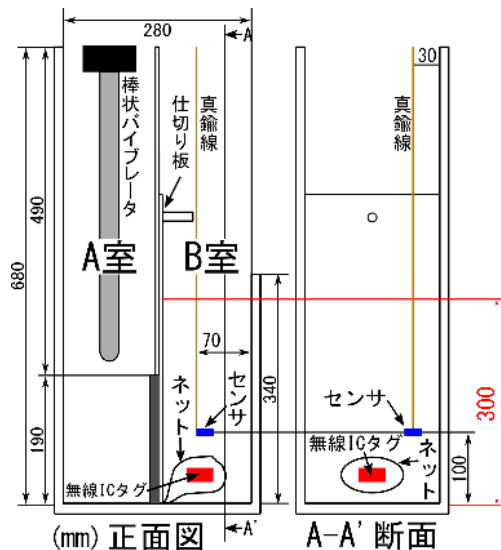


図-5 加振ボックス充填装置およびセンサ・無線 IC タグの設置位置

図-5に無線 IC タグの設置位置, 写真-4に設置方法を示す. 袋状のネットに無線 IC タグを入れ固定を行った.

3.4 結果および考察

実験に使用したコンクリートのフレッシュ性状を表-6に示す.

図-6にスランプ 17cm (1 回目)での計測結果を示す. 300mm ラインにコンクリートが到達するのに要する時間は, 計測開始から 110 秒であった. 約 15 秒から加速度が計測され始め, 30~40 m/s² 程度まで立ち上がったあと, 50 秒にかけて加速度が小さくなり, 約 60 秒にかけて 60m/s² 程度の最大値を計測した.



写真-4 無線 IC タグの設置方法

図-7にスランプ17cm(2回目)の結果を示す. 300mm ライン到達に要する時間は, 計測開始から90秒であった. 約17秒から加速度が計測され, 約40秒にかけて80 m/s²程度まで急激に立ち上がり, 最大値を計測した. その後は緩やかに加速度が減少していることが確認された.

図-8にスランプ19cmの結果を示す. 300mm ライン到達に要する時間は, 計測開始から150秒であった. 10秒から加速度が計測され, 40秒程度において, 60m/s²の最大の加速度を計測された. その後は緩やかに減少しているが, 100秒前後でまた加速度が増大し, 計測終了時刻にかけて加速度が増大した. これは, コンクリートをスランプロスさせた3回目の計測であり, 材料分離を発生している可能性が考えられる.

図-9にスランプ8cmを対象としたRaspberry Piと静電容量式の加速度センサを用いた計測システムでの計測結果を示す. 両者のセンサともに, 締固め中の加速度は一定の加速度に収束する傾向が確認できた. ただし, このスランプ8cmの計測データは, 今回の実験とは別に実施して得られたデータである[5].

図-9のRaspberry Piと静電容量式の加速度センサの計測では, 最大150 m/s²程度の加速度を計測した. 無線ICタグでの結果と比較して最大加速度が大きかった. スランプが8cmでコンクリートの粘性が小さいこと以外に, 以下の2つの原因が挙げられる.

まず, センサの設置位置が異なる点である. Raspberry Piと静電容量式の加速度センサの計測より無線ICタグは, 図-5に示すようにB室の底面付近に設置した. よって, 棒バイブレータと無線ICタグに内蔵されたセンサまでの距離が, Raspberry Piと静電容量式の加速度センサの計測での距離より長い. そのため, 距離減衰の影響を大きく受け, 加速度が小さくなったと考えられる.

次に, 無線ICタグが内蔵されたセンサはケース内にあり, ケースという空間を介して振動が伝達される点である. Raspberry Piと静電容

表-6 コンクリートのフレッシュ性状

加速度計	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
無線ICタグ	17.0	3.3	15.6
	17.0	3.3	12.3
	19.0	3.3	12.1
Raspberry Pi	8.0	2.5	17.8

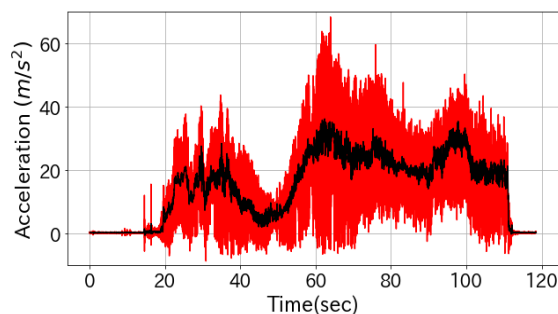


図-6 スランプ17cmでの計測結果 (1回目)

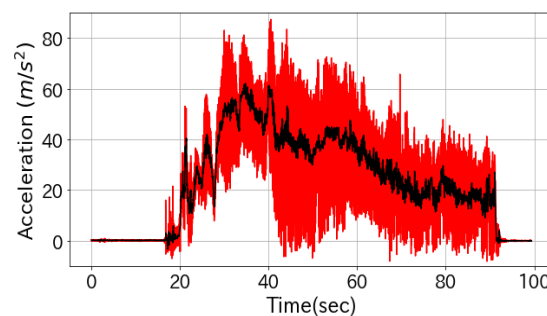


図-7 スランプ17cmでの計測結果 (2回目)

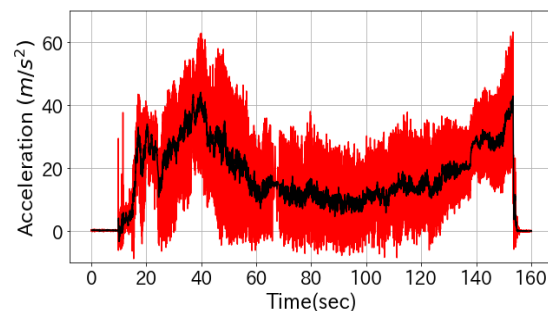


図-8 スランプ19cmでの計測結果

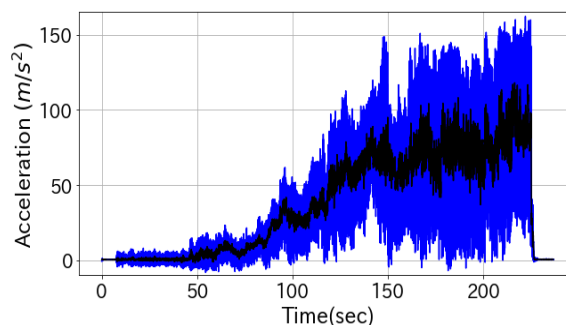


図-9 スランプ8cm, Raspberry Piと静電容量式の加速度センサを用いた計測システムでの計測結果

量式の加速度センサの計測とは異なり、棒バイブレータの振動が直接センサに伝達されないため加速度が小さくなったと考えられる。

4. 結論

本研究では、小型の静電容量型加速度センサを用いて、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・記録するような計測システムの開発を試みた。

計測方法は2つであり、1つは、Raspberry Pi と小型加速度センサを Wi-Fi 環境下で遠隔かつ同時多点計測可能な手法である。もう1つは、小型加速度センサを内蔵した無線 IC タグによる完全無線計測手法である。

以下に得られた結論を記す。

- 1) 締固め途中のフレッシュコンクリート中の伝搬される加速度は、距離減衰の影響を大きく受けることが、本計測システムにおいて定量的に明らかになった。
- 2) 無線 IC タグを用いた完全無線の計測システムは、Raspberry Pi と静電容量式の加速度センサを用いた場合の計測システムの時系列データと同様な時系列データが得られた。
- 3) 加速度はスランプ値に依存しない。
- 4) 締固め作業時の加速度の減衰においては、「距離による減衰」が大きく、「鉄筋の存在」による加速度の減衰は小さい。

【謝辞】 本研究を実施するにあたり、池澤壮大氏および藤原京介氏（ともに当時、徳島大学工学部理工学科社会基盤デザインコースコンクリート研究室4年生）の協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

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] 浦野真次, 根本浩史, 崎原康平: 高流動コンクリートの充てん性評価への流動解析手法の適用に関する研究, 土木学会論文集 E2, Vol.68, No.1, pp.38-48, 2012.1
- [3] 池澤壮大, 橋本親典, 石丸啓輔, 渡邊健: Wi-Fi と Raspberry Pi を用いた振動締固め途中のフレッシュコンクリートに伝搬する加速度の計測, 第 76 回セメント技術大会講演概要集 2022Web 版, Vol.76, 224-225, 2022.5
- [4] 藤原京介, 山地功二, 橋本親典, 渡邊健: 振動締固め途中のフレッシュコンクリートに伝搬される加速度を対象とした加速度センサ付き無線 IC タグを用いた計測システムの開発, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.77, V-117, 2022.9
- [5] 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バイブレータから伝搬される加速度の計測システムの開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, 766-771, 2022.7
- [6] 國府勝郎, 早川健司, 上野敦, 牛島栄: 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試験方法に関するシンポジウム論文集, pp.117-124, 1998.12
- [7] 梁俊, 丸屋剛, 坂本淳, 松元淳一, 下村泰造, 滝沢正徳: 鉄筋間隙を通過するコンクリートにおける締固めエネルギーに基づいた締固め性に関する研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.75, No.2, pp.142-156, 2019.