

# 論文 コンクリートの締固め状況の可視化に関する実験的研究

神代泰道\*1・金子智弥\*2

要旨：振動機による締固め時にコンクリート中に伝わる振動エネルギーの範囲を可視化できれば、締固め状況のシミュレーションが可能となり、効率的な施工計画、品質の向上を図れる可能性がある。本研究ではスランブの異なるコンクリートを対象として振動エネルギーと硬化性状の関係を把握し、締固めに必要な振動エネルギーとスランブの関係を考察した。次に、型枠内のコンクリート中の振動機が発生する振動エネルギーの分布状況を把握した。これらの結果を基にコンクリート中の振動エネルギーの可視化を試みた。

キーワード：スランブ，締固め，振動エネルギー，圧縮強度，単位容積質量

## 1. はじめに

コンクリートはバイブレータ等を用いて適度な振動エネルギーを加えることで、密実になる。コンクリート中に伝わる振動エネルギーの範囲を可視化できれば、打込み時の締固め状況のシミュレーションが可能となり、効率的な施工計画による人手不足の解決、初期欠陥の防止による品質の向上を図れる可能性がある。

締固めによる振動エネルギーとコンクリートの硬化性状の関係については、硬練りコンクリートを対象とした研究した事例<sup>1)</sup>はあるが、建築分野で用いられる比較的軟練りのコンクリートを対象とした研究事例はない。そこでスランブ 8cm～21cm のコンクリートおよび増粘成分を含む流動化剤を添加してスランブフロー55cm とした流動化コンクリート<sup>2)</sup>を対象とし、スランブの異なるコンクリートについて、振動エネルギーと硬化性状の関係を把握した。さらに、型枠内に打ち込まれたコンクリート中の加速度を測定し、コンクリート中に伝播する振動エネルギーの伝播状況を確認した。これらの結果を用いてコンクリートの締固め状況の可視化シミュレーションを試みた。

## 2. 振動エネルギーと硬化性状の把握

### 2.1 実験概要

ここでは流動性の異なるスランブ 8cm～21cm のコンクリートおよび増粘成分を含む流動化剤を添加してスランブフロー55cm とした流動化コンクリート<sup>2)</sup>を対象として、振動エネルギーと硬化性状の関係を把握した。実験ではテーブルバイブレータを用いてコンクリート供試体に振動を与え、供試体に作用する加速度から振動エネルギーを算定し、振動エネルギーとコンクリートの硬化性状の関係を把握した。

### (1) 測定システム

振動はセメント強さ試験用のテーブルバイブレータ（モータ回転数 2,800rpm）を用いて与えた。加速度は加速度計（500m/s<sup>2</sup>，応答周波数 520Hz）と動ひずみ計を用いて測定した。写真 - 1 に測定システムを示す。実験に先立ち、テーブル上の加速度を X，Y，Z 軸方向について測定した。その結果を図 - 1 に示すが、バイブレータによる振動は Z 軸方向（鉛直，±40m/s<sup>2</sup>）が主であり、水平成分の X 軸および Y 軸は無視できることを確認した。また、周波数は 46.8Hz で、モータの回転数（46.6Hz）とほぼ一致した。次にテーブルバイブレータにコンクリートを充填した円柱供試体を 2 個固定し、テーブル上および供試体の型枠に加速度計を取り付け、垂直方向の加速度を測定した。その結果、加速度はいずれの箇所でも同じ大きさであった。以上のことから、加速度は、テーブルに取り付けた加速度計により、Z 軸方向（鉛直）成分を測定した。



写真 - 1 計測システム

\*1 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 博(工)(正会員)

\*2 同 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員

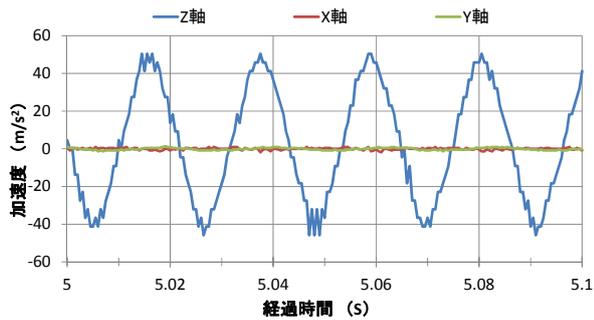


図 - 1 テーブルバイブレータの加速度測定結果

村田らによると振動エネルギーは加速度と振動時間で以下のように表すことができる<sup>3)</sup>。

$$Et = \rho \frac{\alpha^2}{4\pi^2 f} t \quad (1)$$

Et : t 秒間に受ける振動エネルギー(J/L)

: コンクリートの単位容積質量(kg/L)

t:振動時間(t),  $\alpha$ :加速度 (m/s<sup>2</sup>), f: 振動数(Hz)

今回使用するテーブルバイブレータが発生する加速度を 40m/s<sup>2</sup>, 周波数 46.6Hz, コンクリートの単位容積質量を 2.3t/m<sup>3</sup> とすると単位秒あたりの振動エネルギーは(1)式から 2.0J/L となる。既往の研究<sup>1)</sup>によると硬練りコンクリートの締固めに必要なエネルギーは 10J/L 以下であるので, このテーブルバイブレータを用いて 5 秒間程度の振動を与えれば十分に締固めができることが分かった。そこで振動時間は 0, 1, 2, 4, 5, 20 秒で設定することとした。

### (2)コンクリートの調合

コンクリートは表 - 1 に示すようにスランブの異なる 6 種類のコンクリートとした。スランブの設定値は 8~21cm とし, 練り混ぜ直後のスランブは設定スランブ ± 2.5cm とした。空気量は 4.5 ± 1.5% とした。スランブ 8, 12, 15cm は AE 減水剤を用い, スランブ 18, 21cm は高性能 AE 減水剤を用いた。流動化コンクリートについては, ベースコンクリートのスランブを 18cm とし, 増粘成分を有する流動化剤を添加してスランブフローを 55 ± 5 cm とした。練り混ぜはセメント・骨材を投入後 10 秒空練りを行い, 水・化学混和剤を投入してから 90 秒間練り混ぜた。練り混ぜ後 5 分間静置した後に練り直しを行ってから試験を行った。流動化する場合は, 一旦コンクリートをミキサに戻し, 流動化剤を添加してから 90 秒間練り混ぜた。

### (3)試験方法

コンクリートを 100 × 200mm の供試体の天端まで締固めを行わずに静かに流し込み, 天端面ですり切った。

コンクリート供試体をテーブルバイブレータに固定し, 振動時間 (0, 1, 2, 4, 5, 20 秒) をタイマーで設定して振動を与えた。供試体は各振動時間に対して 2 個とした。あわせて JIS A 1132 「コンクリート強度試験用供試体の作り方」( 2 層に分け, 突き数 8 回とした) に基づいた供試体も採取した (以降, JIS 採取という)。振動を与えた直後にコンクリートの天端面の中央の沈降量を測定した。また, 脱型後の外観を観察し, 標準水中養生を行ってから材齢 28 日で単位容積質量, 圧縮強度を測定した。

表 - 1 コンクリートの調合

No.	スランブ <sup>o</sup> (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
				W	C	S	G
1	8	50	45.5	165	330	815	989
2	12	50	46.4	165	330	830	974
3	15	50	47.9	170	340	847	935
4	18	50	50.1	170	340	886	896
5	21	50	51.7	175	350	903	857
6	18→55	50	50.1	170	340	886	896

C : 普通ポルトランドセメント, W : 水道水

S:陸砂, G : 硬質砂岩碎石

## 2.2 実験結果

### (1) フレッシュコンクリートの試験結果

各コンクリートのフレッシュコンクリートの試験結果を表 - 2 に示す。各調合とも所要のスランブ, 空気量を満足することを確認した。

表 - 2 フレッシュコンクリートの試験結果

No.	スランブ <sup>o</sup> (cm)	スランブ <sup>o</sup> 加 <sup>o</sup> (cm)	空気量 (%)	単位容積 質量 (kg/m <sup>3</sup> )	コンクリート 温度( )
1	10.5	22.5 × 22.5	3.3	2, 347	19
2	12.5	24.0 × 23.0	4.8	2, 317	20
3	15.0	26.0 × 24.5	5.2	2, 300	20
4	19.0	32.0 × 31.5	4.7	2, 310	19
5	20.0	31.0 × 31.5	5.0	2, 307	21
6	18.0	29.5 × 29.0	3.8	2, 335	21
	26.0	56.0 × 57.5	3.2	2, 370	21

### (2) 天端の沈降量と目視観察結果

テーブルバイブレータで振動を与えた後のコンクリート天端の沈降量の測定結果を図 - 2 に示す。供試体 2 個の平均値とした。スランブが小さいほど振動による沈降量が大きくなる。スランブ 8cm では振動時間 4 秒以上, スランブ 12cm 以上のコンクリートについては振動時間 2 秒以上でコンクリートの沈降量は収束する傾向であった。コンクリートの脱型後の供試体の外観の一例としてスランブ 15cm の場合を写真 - 2 に示す。そのまま流し込んだ場合と振動時間を 1 秒とした場合は豆板が見られた。振動時間 2 秒以上で豆板は減少した。

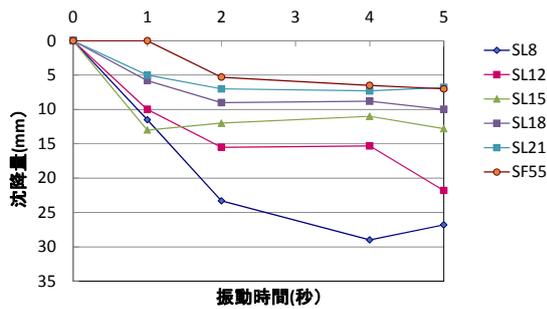


図 - 2 コンクリート天端の沈降量と振動時間



写真 - 2 振動を与えた供試体の外観 (スラブ 15cm)

### (3) 硬化コンクリートの試験結果

振動時間とコンクリートの単位容積質量, 圧縮強度の関係を図 - 3 および図 - 4 に示す。振動無しの場合, スラブが小さいほど 単位容積質量と圧縮強度は小さく, スラブリフロー55cm については, スラブリで管理されるコンクリートに比べて単位容積質量, 圧縮強度ともに大きくなった。いずれのコンクリートも振動時間の増加に

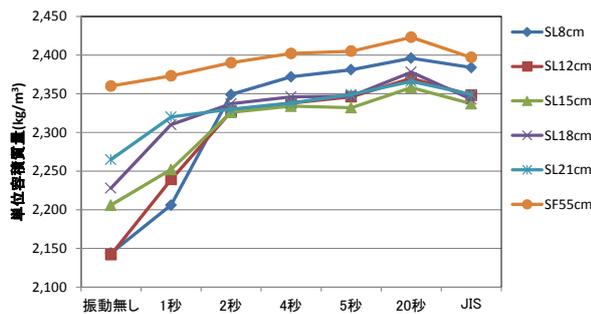


図 - 3 振動時間と単位容積質量の関係

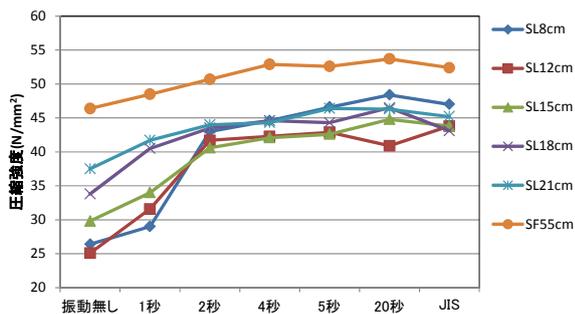


図 - 4 振動時間と圧縮強度の関係

応じて単位容積質量, 圧縮強度は大きくなり, 天端の沈降量および供試体外観の目視観察結果と同様の傾向であった。スラブが小さいほど振動に伴う圧縮強度および単位容積質量の増加の割合は大きくなった。

### (4) 加速度の測定結果

一例として, スラブ 15cm の場合の振動時間の設定を 2 秒と 5 秒とした場合の加速度の測定結果を図 - 5 に示す。振動時間が短いと加速度の応答波形は, 立ち上がりや終了時の揺動の影響が大きく, 一定の状態が短くなる。4 秒以上振動を継続すると, 加速度はテーブルパイプレータの仕様どおりの加速度 ( $40\text{m/s}^2$ ) が得られた。

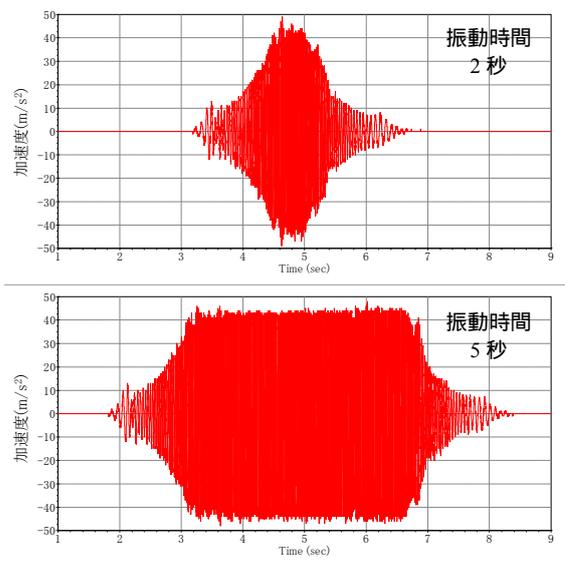


図 - 5 加速度の測定結果 (スラブ 15cm)

### (5) 振動エネルギーと硬化性状

波形処理プログラムを用いて各振動時間における加速度の応答波形について, 周期毎の加速度のピーク値を平均化した。これを(1)式における加速度としてエネルギーを算定した。周波数は加速度の応答波形の周波数を用い, 密度はフレッシュコンクリート試験結果を用いた。振動時間と振動エネルギーの関係を図 - 6 に示す。テーブルパイプレータにより, いずれのコンクリートについてもほぼ同様の振動エネルギーを与えることができた。振動時間 1 秒では振動エネルギーは 1J/L 未満となり, 振動時間 4 秒ではほぼ 10J/L となった。

ここで各コンクリートについて, JIS 採取の単位容積質量および圧縮強度を 1.0 とし, これに対するそれぞれの比率と振動エネルギーの関係を図 - 7 に示す。振動エネルギーの増加に伴って単位容積質量と圧縮強度の JIS 採取に対する比率は 1.0 に近づく。スラブが小さいほど締固めには大きな振動エネルギーが必要であり, 単位容積質量の比率が 0.99 になる場合の振動エネルギーを図から求めると, スラブ 8cm では 5J/L, 12cm では 3J/L,

15cm では 2J/L となり、スランプ 18cm 以上では 1J/L 以下となった。0.99 倍としたのは既往の研究<sup>1)</sup>を参考とし、今回の実験結果から実用上ほぼ十分に締め固まっている状態と判断したものである。なお、単位容積質量の比率 0.99 は圧縮強度の比率 0.95 に相当した。

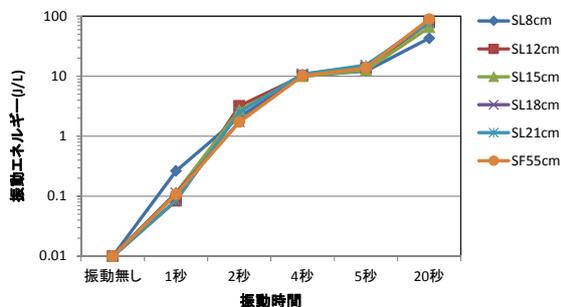


図 - 6 振動時間と振動エネルギーの関係

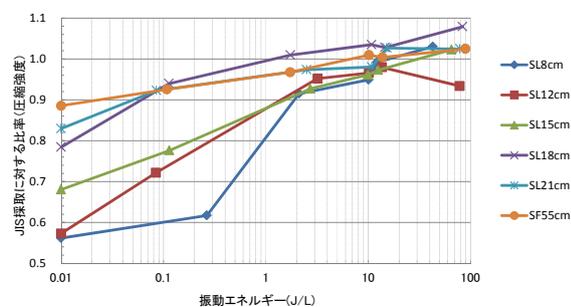
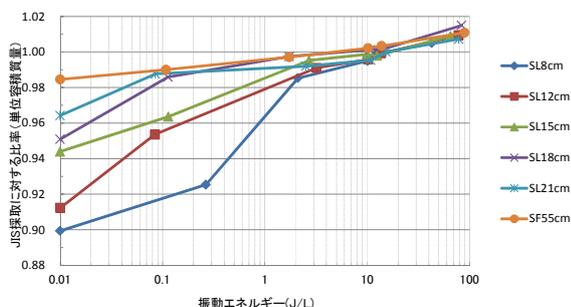


図 - 7 振動エネルギーと JIS 採取に対する単位容積質量と圧縮強度の比率

### 3. コンクリート中の振動エネルギーの伝播状況

コンクリート中の振動エネルギーの伝播状況を確認するため、2 章と同様のコンクリートを型枠内に流し込み、内部振動機による振動を与えて加速度を測定した。さらに振動機が発生する振動エネルギーの断面方向の伝播状況を確認するため、マスブロック型枠内にコンクリートを流し込み、内部振動機による振動を与えて加速度を測定した。加速度は、いずれの場合も振動体の方向(水平成分)を対象とした。

### 3.1 実験概要

#### (1) 小型型枠を用いた実験

ここではスランプの異なるコンクリートについて、コンクリート中の振動エネルギーの伝播状況を確認した。コンクリートの使用材料および調合は 2 章と同様とした。実験の状況を写真 - 3 に示す。型枠は幅 400 × 長さ 1,000 × 高さ 300mm とし、加速度計を高さ 150mm の位置にパイププレートから 100mm 間隔で 6 ヶ所設置した。パイププレートは 40mm の内部振動機を用い、コンクリート(120L)を型枠中に締め固めを行わずに流し込んだ後に、振動を与えて加速度を測定した。パイププレートは固定した状態で 25 秒間加振した。

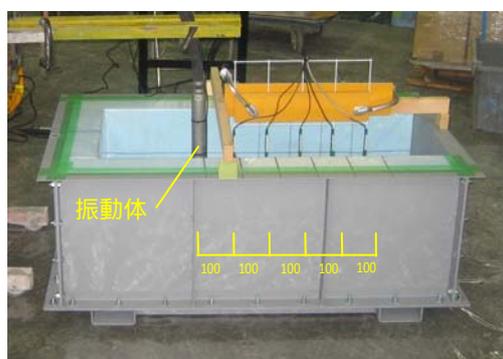


写真 - 3 小型型枠を用いた実験

#### (2) マスブロックを用いた実験

実験の状況を写真 - 4 に示す。型枠は 1,000 × 高さ 700mm のマスブロックとし、スランプ 15cm のコンクリートを高さ 600mm まで流し込んでから加速度計を複数取り付け付けた測定棒をコンクリート中に挿入し、加速度を測定した。コンクリートはレディーミクストコンクリート工場から出荷した呼び強度 30、スランプ 15cm のコンクリート(W/C=49.5%, AE 減水剤)とした。パイププレートは 43mm のものを用いた。パイププレートはマスブロックの中心に固定し、測定棒をパイププレートから 100mm 離れた場所に挿入し、水平方向に 100mm 移動して盛り替えながら、各所で 10 秒間加振して加速度を測定した。

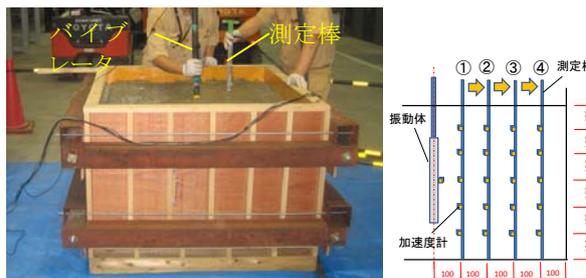


写真 - 4 マスブロックを用いた実験

### 3.2 実験結果

#### (1) 小型型枠を用いた実験

加速度の測定結果の一例としてスランブ 15cm の場合について図 - 8 に示す。加速度はパイプレータからの距離が長くなるにしたがって減衰した。振動時間が長くなっても加速度の大きさはほとんど変化なく、振動時間の長さによる影響は小さかった。加速度の測定結果を基に算定した振動エネルギーの分布状況を図 - 9 に示す。振動時間の増加に伴って振動エネルギーは増加した。ここでスランブ 15cm のコンクリートの締め固めが十分となる振動エネルギーは、2 章において検討した結果から  $2J/L$  以上であったので、これを基に締め固めが可能となる範囲（パイプレータからの距離）を図から求めると振動時間 5 秒で 250mm、10 秒で 280mm となる。同様の方法で他のスランブの振動時間 10 秒で締め固めが可能となる範囲を求めると、スランブ 8cm では約 200mm、スランブ 21cm では約 500mm であった。スランブが大きいほど、締め固めされる範囲が大きくなる傾向を把握できた。なお、パイプレータを一定の高さに設置した状態での結果であり、実際は使用するパイプレータの仕様が異なることや上下に移動しながらかけるので、上記の範囲はあくまで目安となる。

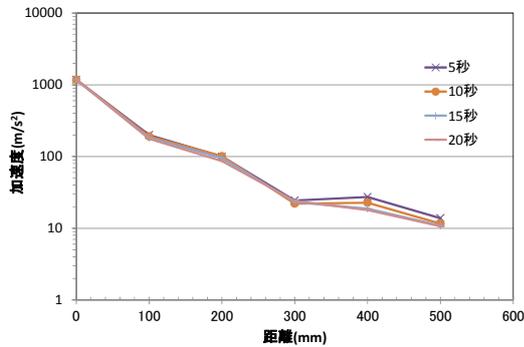


図 - 8 加速度の分布 (スランブ 15cm)

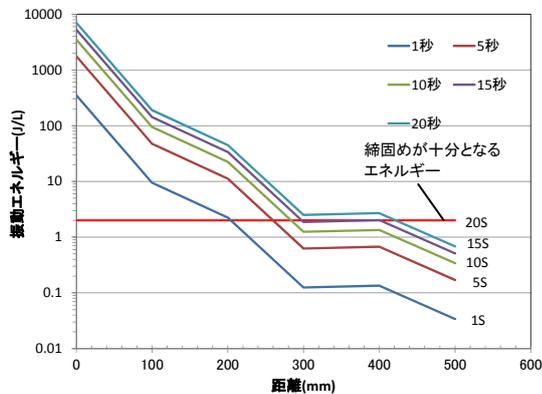


図 - 9 振動エネルギーの分布 (スランブ 15cm)

#### (2) マスブロックを用いた実験

加速度の測定結果として水平方向の分布を図 - 10 に、鉛直方向の分布を図 - 11 に示す。水平方向については、前述の(1)と同様にパイプレータからの距離が長くなるにしたがって減衰する。鉛直方向については、振動体の中心部付近の加速度が大きくなる傾向を示した。使用したパイプレータは振動体の下部に振動軸があるため、下部の方が加速度は大きくなるものと考えられたが、振動機から 200mm 以上離れると、振動体下部よりも中心部の方が大きくなる傾向であった。水平および鉛直方向の加速度の分布から算定した振動エネルギーの分布状況を図 - 12 に示す。振動時間が 5 秒と 10 秒の場合を示したが、振動時間に伴って振動エネルギーが伝播している状況が分かる。

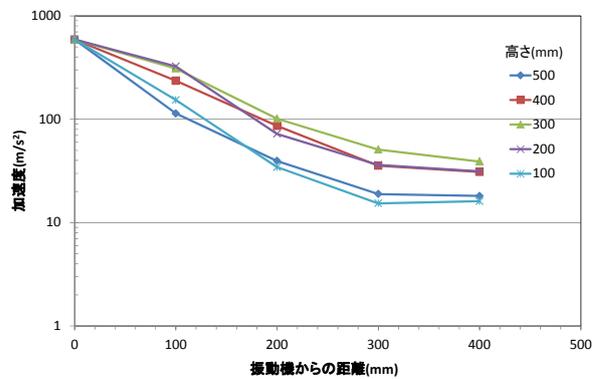


図 - 10 加速度の分布 (水平方向)

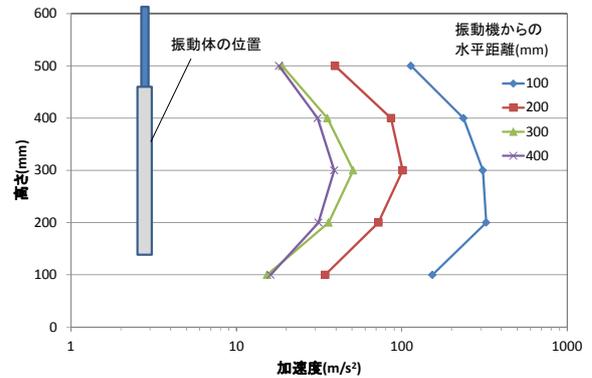


図 - 11 加速度の分布 (鉛直方向)

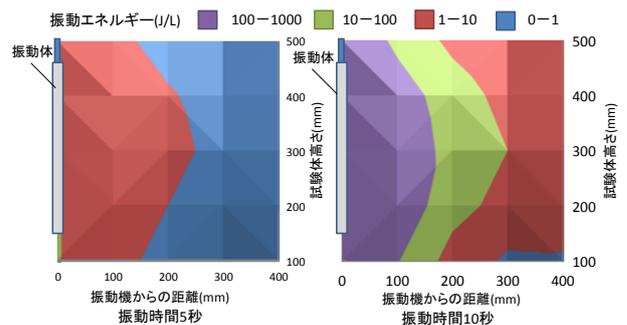


図 - 12 振動エネルギーの分布

#### 4. 振動エネルギーによる締固め状況の可視化

これまでの検討結果を基に、振動エネルギーによる締固め状況の可視化を試みた。打込み範囲を単位ブロックに分割し、パイプレータの位置を設定する。パイプレータからは図 - 12 に示したような振動エネルギーが発生するものとし、単位秒あたりに発生する振動エネルギーが振動時間に応じて各ブロック内に累積するとすれば、この累積した振動エネルギーをブロックごとに表示することで、締固め状況を判定できる。図 - 13 は長さ 1700mm、幅 300mm、高さ 800mm の壁状試験体で、1 層目として高さ 400mm までコンクリートを流し込み、パイプレータを 600mm 間隔、振動時間 2 秒と設定して、「締固め不足」となる状況を模擬したものである。ブロックを 50mm 角とし、ブロック毎の累積した振動エネルギーを色分けして表示したもので、青色は「締固め十分」、その他は「不十分」となる範囲を示している。締固めに必要なエネルギーに応じて色分けすることで締固めの過不足を可視化できる。これにより、締固め状況の可視化シミュレーションが可能となり、初期欠陥の防止や効率的な施工計画の立案に活用できる。

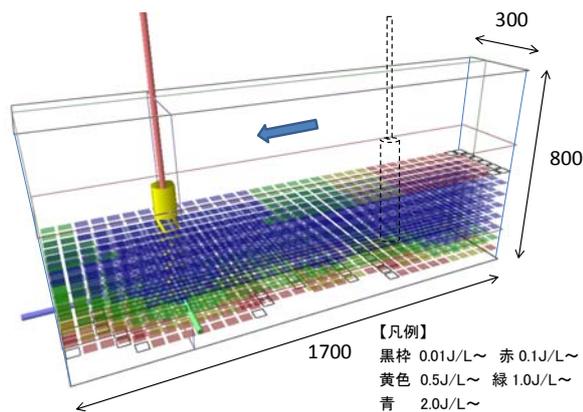


図 - 13 締固め状況の可視化シミュレーション

#### 5. まとめ

本研究ではスランブの異なるコンクリートを対象とし

て振動エネルギーと硬化性状の関係を把握した。次に、型枠内のコンクリート中の振動機が発生する振動エネルギーの分布状況を把握し、これらの結果を基にコンクリート中の振動エネルギーの可視化を試みた。その結果、以下のことが分かった。

- (1) テーブルパイプレータの振動時間の増加に伴い、全てのコンクリートについて単位容積質量、圧縮強度は大きくなり、スランブが小さいほどその増加の割合が大きくなった。振動無しとした場合、スランブフロ-55cmのコンクリートの単位容積質量と圧縮強度は、スランブで管理されるコンクリートよりも大きくなった。
- (2) 単位容積質量が、JIS A 1132 にしたがって採取した供試体の 0.99 倍となるのに必要な振動エネルギーは、スランブが小さい方が大きくなり、スランブ 8cm で 5J/L、12cm で 3J/L、15cm で 2J/L となり、スランブ 18cm 以上については 1J/L 以下であった。
- (3) コンクリート中の加速度はパイプレータからの距離に応じて減衰し、振動時間を長くしても加速度の大きさはほとんど変化しなかった。
- (4) 同じ振動時間であれば、スランブが大きいほど、締固め可能となる範囲が大きくなる。
- (5) 打込み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。

#### 参考文献

- 1) 梁 俊，國府 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法に関する研究，土木学会論文集 62(2), pp. 416-427, 2006
- 2) 小河俊博，齋藤賢，神代泰道，一瀬賢一：増粘型流動化剤を用いた流動化コンクリートの各種性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.1426-1431, 2014
- 3) 村田二郎，國府勝郎ら：コンクリート施工設計学序説，技報堂出版，pp.142-145, 2004