

# 論文 かぶりコンクリートの品質に及ぼす振動締固め方法の影響

早川 健司\*1・鈴木将充\*2・前原聡\*1・伊藤正憲\*3

**要旨:** コンクリート構造物の耐久性確保のために重要となるかぶりコンクリートの品質には物質透過抵抗性、凍結融解抵抗性等があり、これらの品質、すなわちコンクリートの緻密性や気泡分布等に対しては、打込みや締固め等の施工が影響する。本研究では、かぶり付近の棒状バイブレータの適用方法と品質の関係を把握することを目的として、棒状バイブレータの挿入位置等を変化させて作製した模擬部材を対象とし、かぶりコンクリートの各種評価試験を実施した。その結果を締固めエネルギーとの関係として整理、分析し、かぶりコンクリートの品質を確保するために必要な振動締固め方法を示した。

**キーワード:** かぶりコンクリート、棒状バイブレータ、振動締固め、表層透気性、気泡分布

## 1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性を確保するためには、かぶりコンクリートの品質が重要である。かぶりコンクリートに要求される品質には、物質透過抵抗性、凍結融解抵抗性等が要求されるが、これらの品質、すなわちコンクリートの緻密性や空気量、気泡分布等に対しては、打込みや締固め、養生などの施工方法によって異なることが知られている。棒状バイブレータによる締固めについては、挿入間隔や振動時間の標準値がコンクリート標準示方書に示されている。実施工においては、棒状バイブレータの挿入間隔は挿入位置からの振動力の減衰、締固め時間はコンクリートの十分な充填、余分な空気泡の除去、材料分離の抑制といった観点を考慮し、標準値を参考として決定しているのが現状であると考えられるが、かぶり付近のバイブレータの適用方法と品質の関係は十分に把握されているとは言い難い<sup>1) 2)</sup>。

そこで、本研究では、かぶりコンクリートに要求される物質移動抵抗性や耐凍害性、また出来栄を適切に確保するための締固め方法を把握することを目的に、棒状バイブレータの種類、挿入位置を変化させた模擬部材を対象とし、かぶりコンクリートの品質評価試験を実施し、締固め方法との関係について検討した。品質評価は物質移動抵抗性をトレント法による表面透気試験、凍結融解抵抗性はコンクリート表面近傍の気泡分布の測定、出来栄をコンクリート表面の気泡率を算出して行った。また、これらの品質に対する型わく材の影響を検討するため、一般的な合板型わくに加え、余剰水や空気を排出しやすい透水性型枠シートを検討対象とした。締固め方法の違いについては、締固めエネルギーを把握して定量化し、表層品質の評価試験結果と締固めエネルギーとの関係について検討を加えた。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

表-1 に、コンクリートの使用材料および配合をそれぞれ示す。セメントには普通ポルトランドセメントを用い、コンクリートの配合は寒冷地で用いられる標準的なコンクリートを想定して、W/C=50%、目標スランプ 12cm、目標空気量 5.0%として選定した。

表-2 に、フレッシュコンクリートの試験結果を示す。ここで、コンクリートの空気量は JIS A 1128 空気室圧力方法に従い、容器内へは突き棒によって試料を充填した結果である。ブリーディング量は、簡易ブリーディング試験方法(試案)<sup>3)</sup>により測定した。

### 2.2 試験体の作製方法および条件

図-1 に、試験体概要、棒状バイブレータの挿入位置、および評価試験位置について示す。試験体の寸法は幅 500mm、長さ 900mm、高さ 500mm であり、鉛直方向鉄筋 D22 を 150mm ピッチ、水平方向鉄筋 D16 を 300mm ピッチで配置した。鉛直方向鉄筋の芯かぶりは 100mm である。型枠には合板を用い、これに透水性型枠シートを設置したものも用いた。

コンクリートは容量 100 リットルの強制練りパン型ミキサにより、練混ぜ量 85 リットルとして 3 回行い、3 バッチ練混ぜ完了後に人力により一層で打ち込んだ。なお、試験体の作製は 1 バッチ目の練混ぜ後 30 分以内に完了し、試験体作製に供したフレッシュコンクリートの性状は表-2 の範囲であった。

振動締固めには  $\phi 40\text{mm}$  および  $\phi 30\text{mm}$  の高周波の棒状バイブレータ(周波数 240Hz)を用い、試験体の中央、すなわち型わく側面から 250mm の位置に、 $\phi 40\text{mm}$  の棒状バイブレータを 500mm の間隔で 2 か所に挿入(図-1

\*1 東急建設(株)技術研究所土木研究グループ 博(工) (正会員)

\*2 東急建設(株)技術研究所土木研究グループ 工修 (正会員)

\*3 東急建設(株)技術研究所土木研究グループグループリーダー 博(工) (正会員)

表-1 使用材料およびコンクリートの配合

Gmax mm	Air %	W/C %	s/a %	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					C×wt%	
				W	C	S1	S2	G	Ad1	Ad2
20	5.0	50.0	43.0	162	324	531	228	1024	0.25	0.009

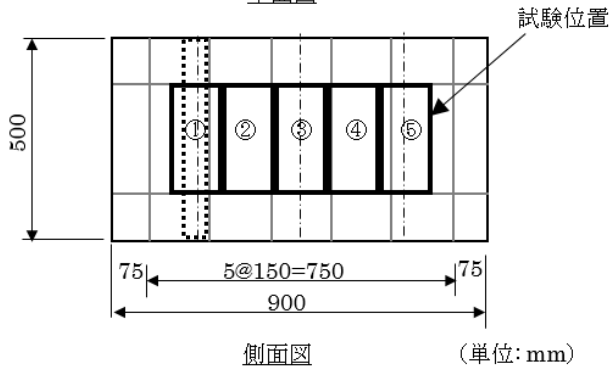
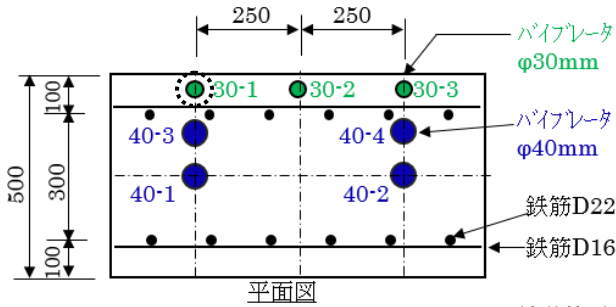
セメント C: 普通ポルトランドセメント, 密度 3.16g/cm<sup>3</sup>  
 細骨材 S1: 砕砂, 表乾密度 2.58g/cm<sup>3</sup>, 粗粒率 2.98  
 細骨材 S2: 陸砂, 表乾密度 2.56g/cm<sup>3</sup>, 粗粒率 1.76  
 粗骨材 G: 砕石 2005, 表乾密度 2.62g/cm<sup>3</sup>, 実積率 60.9%  
 混和剤 Ad1: AE 減水剤標準形, Ad2: 空気連行助剤

表-2 フレッシュコンクリートの試験結果

試験項目	試験結果	
	練混ぜ直後	30 分後
スランプ (cm)	15.0	11.5
空気量 (%)	5.5	5.1
コンクリート温度 (°C)	19	19
簡易ブリーディング量 (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> )	0.21	—

表-3 試験体の作製条件

試験体番号	型枠	棒状バイブレータの挿入位置	
No.1	合板	40-1 40-2	-
No.2			30-1, 2, 3
No.3			30-1, 3
No.4			40-3, 4
No.5	透水性型枠シート		-
No.6			30-1, 2, 3



各試験位置

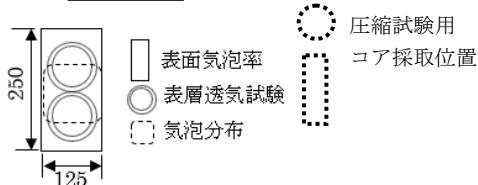


図-1 試験体の概要および試験位置

1 の 40-1, 40-2) した。表-3 に示すように、試験体の作製条件は、この締固めのためのケース No.1 に加え、かぶり部分に直接 φ 30mm の棒状バイブレータを挿入したケース (No.2, 3), 鉛直方向鉄筋の反かぶり側近傍に φ 40mm

のバイブレータを挿入したケース (No.4), また No.1, 2 と締固め条件は同一とし、型わくに透水性型枠シートを適用したケース (No.5, 6) の計 6 条件とした。棒状バイブレータによる締固め時間はいずれも 10 秒である。

試験体の作製は 20°C の室内で実施し、木ごてによる表面仕上げを行った後、仕上げ面はシート、試験対象の側面は材齢 5 日まで型わくを残置し、脱型後は室内に静置した。

### 2.3 コンクリートの品質評価試験

コンクリートの品質評価試験は、試験体側面を対象とした表面気泡率、表層透気試験、気泡分布の測定とした。評価試験位置は図-1 に示す①~⑤ (側面中央からの水平距離: -250, -125, 0, 125, 250mm) の位置であり、試験体高さの中心近傍において実施した。また、一部の試験位置 (No.1, No.2, No.4 の試験位置①) のかぶり部から φ 68mm コアを鉛直方向に採取し、単位容積質量ならびに圧縮強度試験を実施した。

表面気泡率の測定は材齢 7 日で行い、試験対象とした各範囲 (125×250mm) のコンクリート表面に発生した空気泡や砂すじ等の 1mm 程度以上の凹部をトレースし、その面積を二値化処理して算出した。表層透気試験 (トレント法) は、試験範囲内の上下 2 か所において、材齢 7 日および 28 日で行った。気泡分布は、コンクリート表面から 0.5~1.0mm 程度の研磨面を対象とし、ASTM C457-16 によるリニアトラバース法に準拠して材齢 14 日に測定した。試験位置①~③を対象とし、各位置のコンクリート表面を #200, #500, #1000 および #2000 の研磨材を用いて平滑に研磨仕上げを行い測定面とした。なお、

コンクリートのごく表層のモルタル部分を測定していることを考慮し、トラバース長は ASTM C457-06 に従い骨材最大寸法 5mm のときの最小値 1397mm 以上となるように設定した。圧縮強度試験は、かぶり部分から鉛直に採取したφ68mm、延長約 500mm のコアを 4 等分 (h = 110~120mm 程度) としたものを対象とした。試験は、JIS A 1107 に準拠し、材齢約 8 週で行った。

なお、比較のため、鋼製型枠を用い、JIS A 1132「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」の突き棒を用いる方法により作製し、試験体と同様の方法で養生・静置した供試体 (15×15×15cm) の側面を対象とし、表面気泡率の測定、表層透気試験、気泡分布の測定をそれぞれ行った。また、試験時まで封緘養生した供試体 (φ10×20cm) の圧縮強度試験を併せて行った。

## 2.4 締固めエネルギーの算出方法

振動機の種類、挿入位置の違いによる振動締固めの程度を定量化するため、試験位置近傍のコンクリートに作用した加速度を測定し、締固めエネルギー<sup>4)</sup>を算出した。コンクリート中の加速度の測定は、品質評価試験用とは別に、容量 (500m/s<sup>2</sup>) の加速度計を型わく表面から約 20mm の位置に埋設して行った。振動締固め中の加速度は、既往の研究<sup>1)</sup>と同様に、締固め初期のコンクリートが急激に沈下する際に変動が大きい、その後ばらつきはあるものの概ね一定値を示す傾向を示した。本検討では、一度振動締固めを行った後のコンクリートに対し、挿入位置を変化させた際の各位置の加速度の測定を行い、それぞれの加速度の代表値を求め、締固め時間 10 秒、振動数 240Hz として、式 (1) より締固めエネルギーを算出した。

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

ここに、

- E : 締固めエネルギー (J/l)
- ρ : コンクリートの単位容積質量 (l)
- α : コンクリートの応答加速度 (m/sec<sup>2</sup>)
- f : 振動数 (Hz)
- t : 締固め時間 (sec)

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 かぶりコンクリートの品質試験結果

図-2 に、測定位置と表面気泡率の関係を示す。図中には突き棒を用いて作製した供試体 (15×15×15cm) を対象とし、n=3 で実施した表面気泡率の平均値ならびに測定範囲を併せて示す。供試体の表面気泡率は 2.5% 程度であるのに対し、No.1 は同等もしくはこれより大きく、側面中央 (試験位置②~④) で大きくなった。No.1 はφ40mm の棒状バイブレータを試験体中心に 2 か所作用させたケースである。側面中央は棒状バイブレータからの

距離が 300mm 程度であり、試験位置①⑤の 230mm 程度より大きいことが影響している可能性が考えられる。No.5 の振動締固め条件は No.1 と同一であるため、No.1 との差は透水性型枠シートの効果と考えられるが、透水性型枠シートにより、表面気泡率が小さくなり、供試体と同等以下になった。No.1 の棒状バイブレータの挿入に加えて、かぶりもしくはかぶり近傍に棒状バイブレータを作用させた No.2~No.4 の表面気泡率は 1% 以下であり、またコンクリート表面には色斑等もなく出来栄はいずれも良好な状態であった。

図-3 に、測定位置と材齢 28 日において測定した表層透気係数の関係を示す。図中には突き棒を用いて作製した供試体 (15×15×15cm) を対象とし、n=3 で実施した表層透気係数の平均値ならびに測定範囲を併せて示す。表層透気係数は、試験体の測定位置による明確な傾向は認められないが、表面気泡率と同様に No.1、5 の表層透気係数は、他の条件よりも大きくなった。No.2~No.4 の表層透気係数は概ね  $1.0 \times 10^{-16} \text{m}^2$  以下であり、供試体の表層透気係数の測定範囲  $0.059 \sim 0.152 \times 10^{-16}$  (平均  $0.09 \times 10^{-16}$ )  $\text{m}^2$  と比較すると、同等もしくは測定位置により若干大きい値を示した。

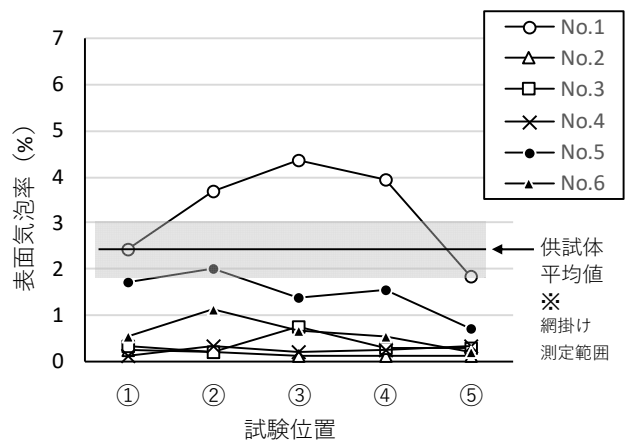


図-2 表面気泡率の測定結果

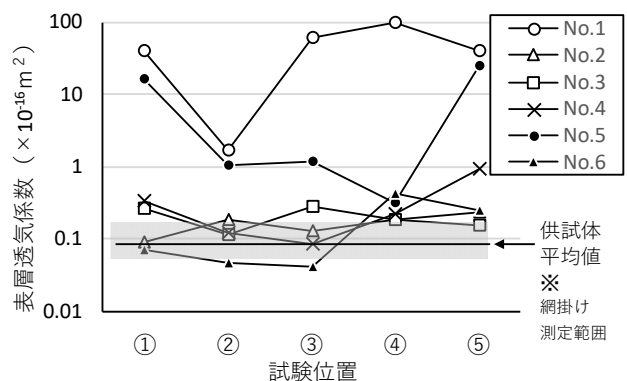


図-3 表層透気係数の測定結果

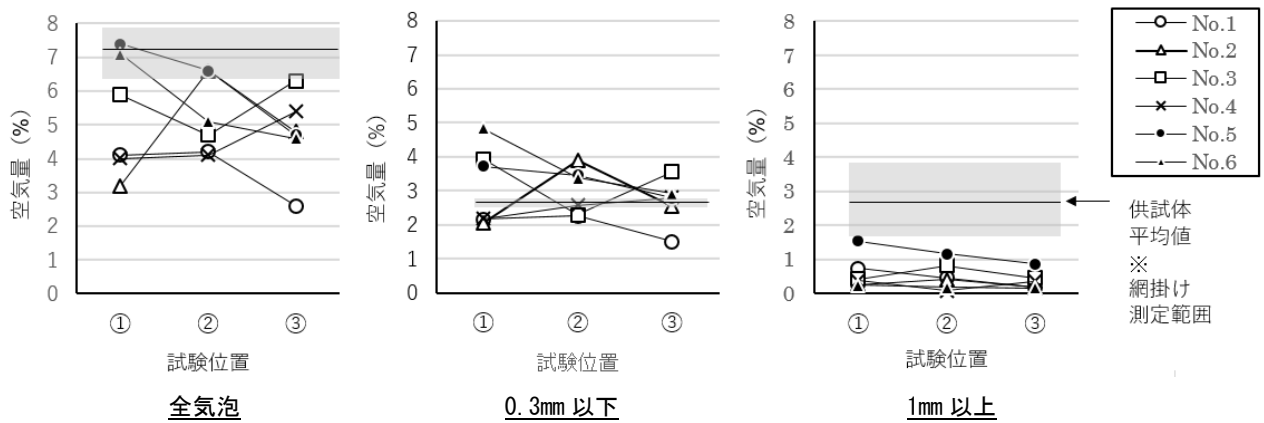


図-4 気泡分布の測定結果から求めた空気量の算出結果

図-4 に、測定位置と気泡分布の測定結果から求めた空気量の関係を示す。図には、全気泡より求めた空気量、エントレインドエアとして連行されやすく、耐凍害性に有効とされる 0.3mm 以下の気泡比率から求めた空気量、1mm 以上の比較的大きい気泡比率から求めた空気量をそれぞれ示している。コンクリート表層近傍の全空気量および 1mm 以上の空気量は、突き棒で作製した供試体が 7.6%および 2.8%であるのに対し、振動締めを行った試験体は概ねこれ以下となった。一方、0.3mm 以下の空気量は、供試体の空気量が 2.6%であるのに対し、振動締めを行った場合は 1.5~4.8%の範囲であった。ここで、供試体の 0.3mm 以下の空気量より振動締めを行った試験体で空気量が大きくなる場合もあるのは、型わくへの振動作用等により気泡が型わく側に移動したことが一因として考えられる。このように、振動締めにより空気量は減少するが、これは比較的气泡径の大きい空気泡が振動締めにより除去された結果であると考えられる。

また、合板と透水性型枠シートで比較すると、側面側へ空気泡が抜けやすいと想定される No.5, No.6 の空気量は、No.1, No.2 よりも同等か大きい傾向にあり、振動締めによって空気泡が側面側に移動したこと、側面側への移動のし易さが表面近傍の空気量に影響していることが示唆される。

図-5 に、測定位置と気泡間隔係数の関係を示す。突き棒で作製した供試体の気泡間隔係数が 332 $\mu$ m であるのに対し、振動締めを行った場合の気泡間隔係数は、No.1 の③を除きこれ以下となった。また、本検討では、かぶり内に直接パイプレータを挿入する場合 (No.2, 3) と、反かぶり側から振動を伝播させる場合 (No.4) を行ったが、両者で明確な違いは認められなかった。

### 3.2 締めエネルギーと各表層品質指標の関係

表-4 に締めエネルギーの算出結果を示す。締めエネルギーは、棒状パイプレータの挿入を試験体中心の

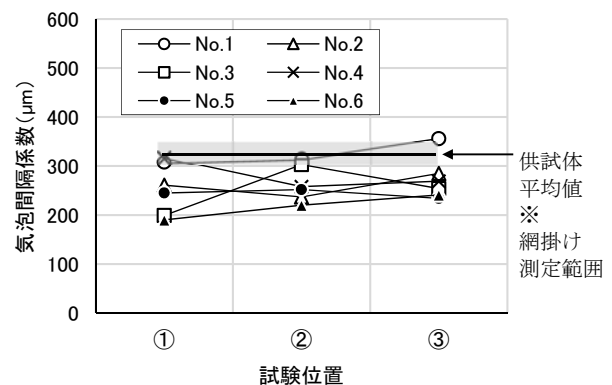


図-5 気泡間隔係数の測定結果

表-4 締めエネルギーの算出結果

(単位: J/l)

試験位置	試験体の側面中央からの距離		
	0mm	±125mm	±250mm
試験体	③	②④	①⑤
No.1, 5	11.1	7.1	8.9
No.2, 6	35.0	23.8	31.3
No.3	13.9	15.5	29.9
No.4	24.1	17.9	38.2

みとした No.1 は 7.1~11.1J/l, これに加えてかぶり近傍に挿入した No.2~No.4 では 13.9~38.2J/l であった。No.2~No.4 の中では、 $\phi$ 30mm の棒状パイプレータを直接かぶり部に挿入した No.2, No.3 の試験位置①⑤よりも、鉄筋の反かぶり側近傍に  $\phi$ 40mm を挿入した No.4 の締めエネルギーが大きくなった。また、かぶり部へ  $\phi$ 30mm を 500mm 間隔で挿入した No.3 では、挿入中間の試験位置③の締めエネルギーは 13.9J/l であり、No.2, No.4 の 35.0J/l, 24.1J/l よりも小さいことが分かる。

図-6, 図-7 に、表面気泡率および表層透気係数を締めエネルギーとの関係で示す。表面気泡率は、締めエネルギーが大きくなると減少する傾向にあり、突き棒

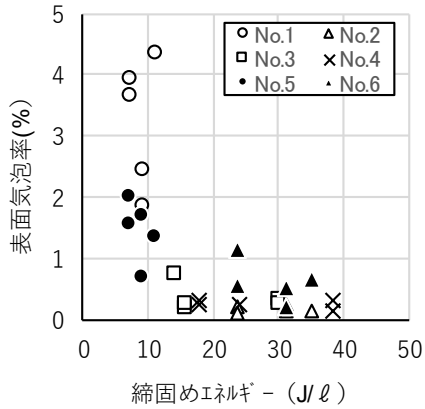


図-6 締固めエネルギーと表面気泡率の関係

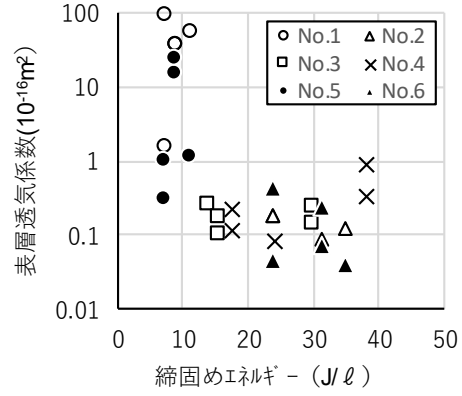


図-7 締固めエネルギーと表層透気係数の関係

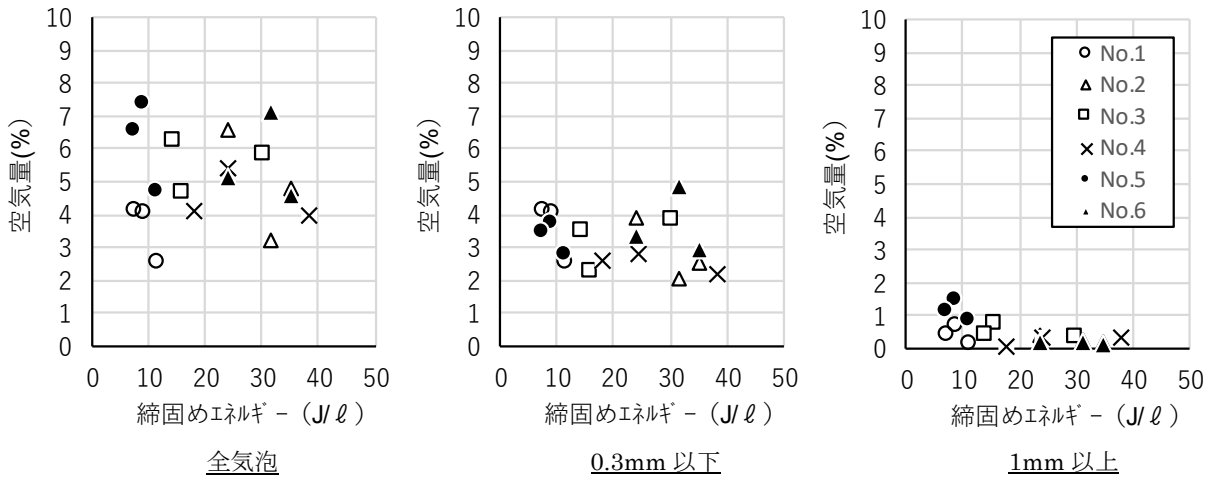


図-8 締固めエネルギーと気泡分布の測定結果から求めた空気量の関係

で作製した供試体と同等のレベルとするためには 10J/l 程度以上の締固めエネルギーを付与する必要がある結果となった。

図-8 に、締固めエネルギーと気泡分布測定から求めた空気量の関係を示す。図には、全気泡から求めた空気量、0.3mm 以下の気泡比率、1mm 以上の気泡比率からそれぞれ求めた空気量を示す。全空気量は 2.8~7.3% の範囲にあり、締固めエネルギーと明確な関係は認められない。同様に、エントレインドエアとして連行されやすい 0.3mm 以下の気泡から求めた空気量についても締固めエネルギーと明確な傾向は認められなかった。一方、1mm 以上の空気量は 1.5% 以下で値は小さいものの、締固めエネルギーが 15J/l 程度以下では 1.5% までの範囲に分布するのに対し、それ以上では 0.5% 程度以下と概ね一定値を示した。

図-9 に、締固めエネルギーと気泡間隔係数の関係を示す。気泡間隔係数と締固めエネルギーとの関係は、耐凍害性の確保に重要となる気泡間隔係数が振動作用に

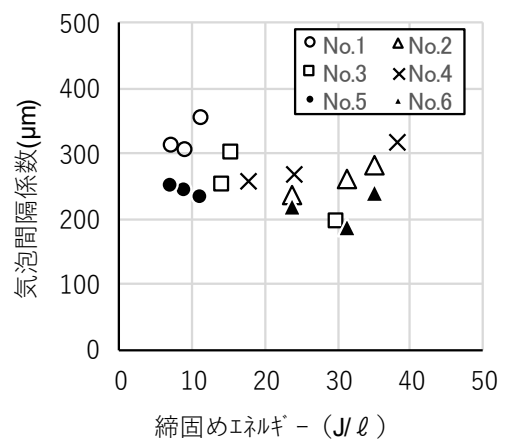


図-9 締固めエネルギーと気泡間隔係数の関係

よって変化する明確な傾向は確認されなかった。

### 3.3 コアの試験結果と締固め方法に関する考察

図-10 に、試験体のかぶり部から採取したコアを対象

とした単位容積質量および圧縮強度の試験結果を試験体の高さとの関係でそれぞれ示す。図中には、供試体の試験結果を併せて示している。単位容積質量は、試験体の上部で供試体と同等であり、試験体の下部ではこれより大きくなった。締固め方法の違いでみると、No.1より大きな締固めエネルギーを受けているNo.2, No.4の単位容積質量はNo.1より大きくなっている。圧縮強度については、No.2の高さ方向の変動が大きいものの、概ね単位容積質量と同様の傾向を示している。これらの高さ方法の分布は、空気泡の除去程度と骨材の沈降により生じていると考えられるが、締固めエネルギーの付与により粗骨材の沈降による高さ方向の材料分離を助長していると考えられる。

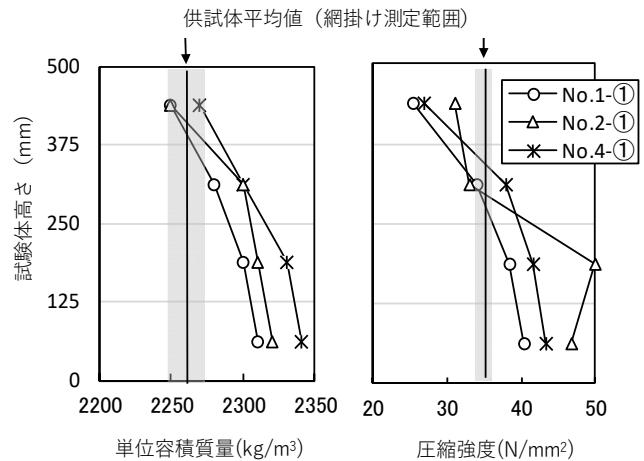
本検討では、試験体高さの中央を対象にかぶりコンクリートの品質を評価した結果、出来栄の一指標となる表面気泡率や表層透気性等を確保するためには10~15J/l程度以上の締固めエネルギーを付与する必要があり、40J/l程度までの締固めエネルギーを付与しても耐凍害性の確保に必要とされる0.3mm以下の空気量や気泡間隔係数への影響は限定的であることが確認された。ただし、過剰な締固めエネルギーの付与は粗骨材の沈降等の材料分離を助長することになるため、本検討で用いたスランブ12cm程度のコンクリートのかぶり品質を確保するための締固めエネルギーは比較的大きな気泡を除去できる10~15J/l程度が目安になると考える。ただし、本検討は1種類のコンクリートを用いた結果であり、コンクリートのスランブによって、また同じスランブのコンクリートでも使用材料や配合によって最適な締固めエネルギーは異なるため、今後のデータの蓄積等の検討が必要である。

#### 4. まとめ

本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

(1) 表面気泡率、表層透気係数の測定結果から、表層品質を確保するための締固めエネルギーは10J/l以上であった。

(2) 振動締固めを行った場合、コンクリート表層近傍の全空気量および1mm以上の空気量は、突き棒で作製した



図—10 単位容積質量および圧縮強度

供試体より小さくなった。一方、耐凍害性に有効とされる0.3mm以下の空気量は、供試体の空気量2.6%に対し、振動締固めを行った場合は1.5~4.8%の範囲であった。

(3) 気泡分布の測定結果から、気泡径1mm以上の比較的大きな気泡の除去には15J/l程度以上の締固めエネルギーが必要であり、40J/l程度までの範囲ではエントレインドエアの消失等、耐凍害性の確保に有効な気泡分布への影響は小さいことが確認された。

#### 参考文献

- 1) 早川健司, 加藤佳孝: かぶりコンクリートの品質に及ぼす配合および施工方法の影響, 土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造), Vol.68, No.4, pp.399-409, 2012.
- 2) 日本コンクリート工学会: コンクリート中の気泡の役割・制御に関する研究委員会報告書, pp.113~121, 2016.6
- 3) 日本コンクリート工学会: 構造物の耐久性向上のためのブリーディング制御に関する研究委員会報告書, pp.252-261, 2017.6
- 4) 國府勝郎, 上野敦: 締固め仕事量の評価に基づく超硬練りコンクリートの配合設計, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp.109-118, 1996.2