

振動締固め時間が異なるコンクリートにおける凍結融解抵抗性の評価

松江工業高等専門学校

○石原 孔

松江工業高等専門学校 正会員

周藤 将司

1. はじめに

耐凍害性の確保が求められるコンクリート構造物には、一般に、混和剤を用いてエントレインドエアを連行させた AE コンクリートが用いられる。しかし、AE コンクリートの場合であっても、プレキャスト（以下、PCa）コンクリート製品の一部には、凍結融解による早期劣化が見受けられる場合がある¹⁾。この凍結融解による劣化は、製造的要因として振動締固めの影響が一因となっていると考えられる。

振動締固めは、フレッシュコンクリートの空気量を減少させることが知られている²⁾。AE コンクリートに振動を加えた場合、微細な気泡は影響を受けにくいと言われている³⁾。しかし、PCa コンクリートは外観を意識した長時間の振動締固めが行われる場合がある。振動締固めによって、微細な気泡は確実に減少しており、場合によっては凍結融解抵抗性に影響を及ぼすことが知られている⁴⁾。しかし、その影響度合いについては明らかにされていないのが現状である。

そこで、本実験では、振動締固め時間を変化させたコンクリートにおいて、振動直後と硬化後の空気量測定、凍結融解試験を実施した。これらの結果から、振動締固め時間が空気量と凍結融解抵抗性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

2. 実験概要

コンクリートの使用材料を表1に、配合を表2に示す。設計スランプ値は $8.0 \pm 2.5\%$ とし、振動前の設計空気量は $6.0 \pm 1.5\%$ とした。

本実験では、振動締固め時間の違いによるコンクリートの凍結融解抵抗性を確認するため、振動締固め時間を $0 \sim 240\text{s}$ までを 60s ごとに区切った5水準に設定した。振動締固めには、低周波の振動台式振動機（周波数 56Hz ）を用いた。

フレッシュコンクリートについては、JIS A 1128 に準拠して連行空気量の測定を行った。測定時には、各

表1 使用材料

	記号	表乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	FM.	種類
細骨材	S	2.54	1.75	2.71	加工砂
粗骨材	G	2.78	0.85	6.76	安山岩
その他の材料	セメント : C (普通ポルトランドセメント) 水 : W (上水道水) 混和剤 : Ad1 (高性能減水剤) Ad2 (AE 剤)				

表2 配合表

W/C (%)	単位量 (kg/m^3)				混和剤 (g/cm^3)	
	W	C	S	G	Ad1	Ad2
45	165	367	886	859	2.13	23.6

層のコンクリートを詰めた後に、所定の振動締固め時間の3分の1ずつ振動を加えた。

硬化後の試験として、圧縮強度試験、凍結融解試験、気泡分布測定を行った。各試験に用いる供試体は、円柱、角柱ともにコンクリートを二層に分けて型枠に詰めて作製した。振動は、所定の振動締固め時間の半分ずつを各層充填時に加えた。圧縮強度試験は、JIS A 1108 に準拠して行った。凍結融解試験は、JIS A 1148 (A 法) に準拠して行った。凍結融解試験における測定項目は、一次共鳴振動数、超音波伝播速度、質量とした。超音波伝播速度からは、緒方らの提案する実験式によって相対動弾性係数を求めた⁵⁾。気泡分布測定は、ASTM C 457 に準拠してリニアトラバース法により行った。評価項目は、空気量、気泡径分布、気泡間隔係数である。供試体は、材齢91日以上経過した円柱供試体 ($10 \times 20\text{cm}$) を用い、測定面は打設面から 5cm の位置の断面とした。

3. 実験結果

3.1 連行空気量測定結果

フレッシュ時における振動直後の空気量と硬化後の空気量の関係を図1に示す。振動直後の空気量は、 $4.6 \sim 6.8\%$ の範囲にあり、コンクリートに長時間の振動を加えても、耐凍害性に有効な空気量である 4.5% は連行

キーワード プレキャストコンクリート、振動締固め時間、空気量、凍結融解抵抗性、気泡間隔係数

連絡先 〒690-8518 島根県松江市西生馬町14-4 TEL0852-36-5111

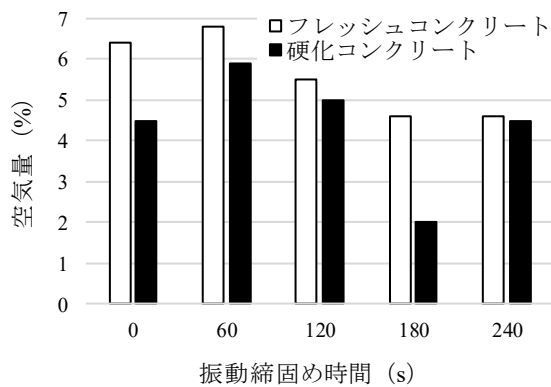


図1 振動後と硬化後の空気量

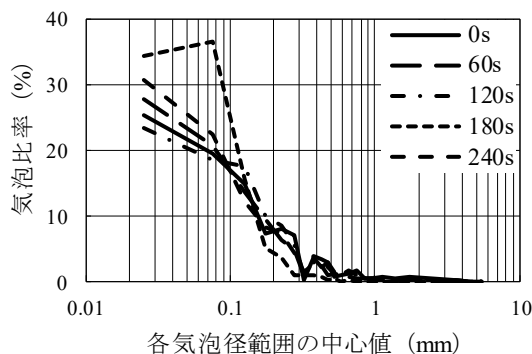


図2 各気泡径範囲における気泡比率

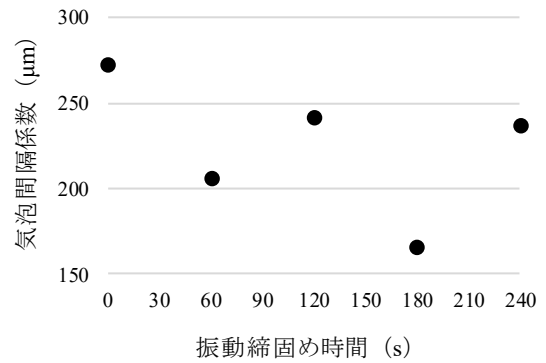


図3 振動締固め時間と気泡間隔係数

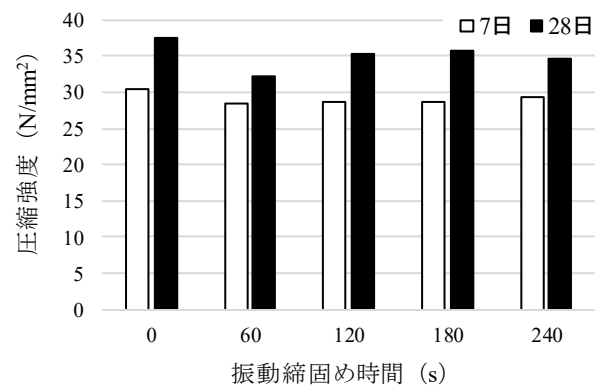


図4 圧縮強度試験結果

されていることが確認された。また、空気量は、振動締固め時間の増加に伴い、減少することが確認された。硬化後の空気量は、振動後の空気量に比べ、すべての水準で小さい値を示した。これはコンクリートの凝結過程における気泡の消失などによるものと考えられる⁶⁾。しかし、振動締固め時間の増加に伴う空気量の減少傾向は、フレッシュ時の測定の時ほど明確には確認できなかった。

3.2 気泡分布測定結果

リアトラバース法による気泡分布測定から得られた各気泡径範囲における気泡比率を図2に示す。既往の研究では、振動を加えても0.3mm以下の微細な気泡の残存率は高いと言われている³⁾。本試験においても、振動締固め時間の増加に関係なく、0.3mm以下の微細な気泡が多く分布しているため同様な傾向を示したと言える。また、振動締固め時間と気泡間隔係数の関係を図3に示す。気泡間隔係数は、値が小さいほど凍結融解抵抗性が高くなり、一般に250μm以下になると凍結融解抵抗性が確保されと言われている。本試験においては、振動締固め時間の増加による明確な差は確認されなかったが、すべての水準において、気泡

間隔係数は低い値を示した。これは、測定した断面が、振動締固めにより供試体上部に移動したエントレインドエアが多く存在する部分であったためだと考える。

3.3 圧縮強度試験結果

材齢7日、28日で行った圧縮強度試験結果を図4に示す。材齢経過に伴う強度増進は確認されたものの、振動締固め時間の増加による強度の増加傾向が得られなかった。一般に、空気量が1%増加すると、強度は4～6%程度低下することが知られている。しかし、本試験では、空気量の低下に伴う強度増進は確認されなかった。この要因として、振動締固めにより供試体上層部に脆弱部が生じ、正確な強度を測ることができていなかった可能性が考えられる。ここで、図5に供試体の破壊形状を示す。一般的な場合、外観的に明らかな欠損は生じず、斜め方向のせん断破壊の形状を示すが、本実験では、上層部が欠ける破壊形態を示している。このことから、上層部に気泡だまりが生じており、この部分が脆弱部となっていた可能性が考えられる。

3.4 凍結融解試験結果

3.4.1 相対動弾性係数

一次共鳴振動数から求めた相対動弾性係を図6に示



図5 供試体の破壊形状

す。相対動弾性係数はサイクル数が進む毎に低下することが確認された。300 サイクル時の値は78～92%の範囲内であった。しかし、振動締固め時間180sの方が240sよりも値が低下するなど、振動締固め時間の増加によって相対動弾性係数が小さくなるという傾向は確認されなかった。一方で、超音波伝播速度から求めた相対動弾性係数を図7に示す。一次共鳴振動数から求めた相対動弾性係数とは異なり、振動締固め時間が長いほど、300 サイクル時の相対動弾性係数は小さくなることが確認された。なお、240～270 サイクルの間に、180s と 240s のデータの大小関係が逆転しているが、この理由については不明である。

3.4.2 質量減少率

質量減少率を図8に示す。質量減少率はサイクル数が進む毎に増加傾向にある。しかし、300 サイクル時の質量減少率は最大で2%程度と低く、振動締固め時間の違いによる影響も明確には示されなかった。試験時の外観の確認からは、表層のペースト部分のみでスケーリングが進行していることが確認された。このことから、振動締固め時間の増加は、表面の劣化であるスケーリングに対する影響度合いが小さいことが確認された。

4. 考察

4.1 二つの試験から求めた相対動弾性係数の関係

二つの試験より求めた300 サイクル終了時における相対動弾性係数の散布図を図9に示す。図より、双方の相対動弾性係数には正の相関性があることが確認された。しかし、緒方らの研究では、両者の相対動弾性係数は、ほぼ1:1の関係になるとされており⁵⁾、本試験結果とは対応しない。これは、振動締固め時間の増加により供試体内部の骨材分布が不均一になることで、一次共鳴振動数および超音波伝播速度の測定に影響を及ぼした可能性が考えられる。一次共鳴振動数の測定

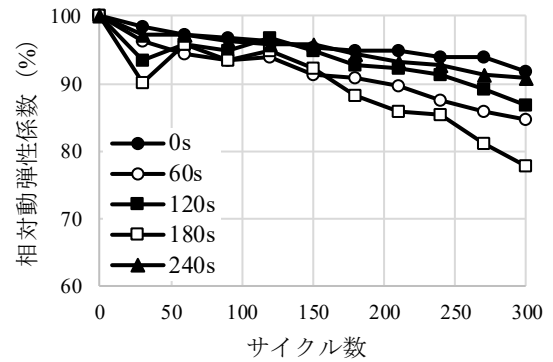


図6 一次共鳴振動数から求めた相対動弾性係数

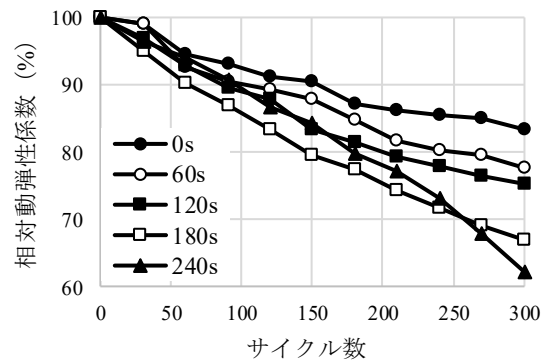


図7 超音波伝播速度から求めた相対動弾性係数

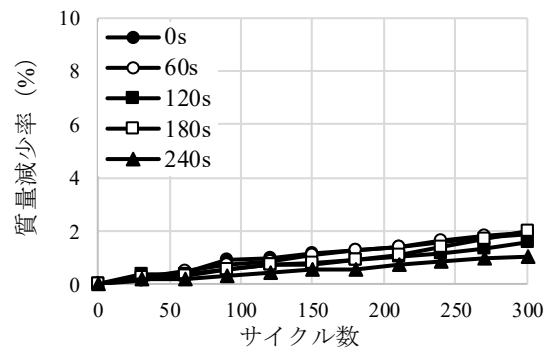


図8 質量減少率

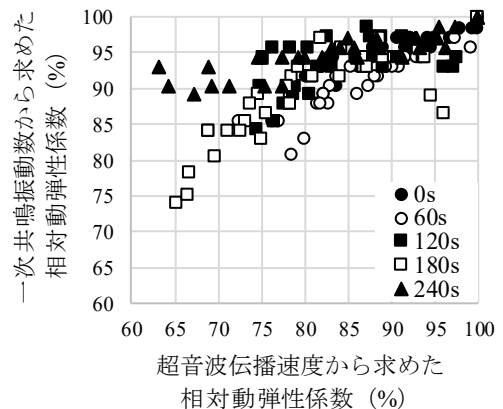


図9 相対動弾性係数の散布図

は、供試体にたわみ振動を与えることで求めるため、駆動端子を固定し、ピックアップを供試体の端面に接触させる。そのため、自由に測定位置を変化させることができず、骨材の分布の影響を受けやすくなる。一方、超音波伝播速度の測定は、供試体の両端に探触子を接触させて、探触子の位置を端面中央付近で僅かに変化させながら最小値を読み取っているため、比較的、内部の影響を受けにくいと考える。

4.2 気泡分布と凍結融解抵抗性の関係

気泡分布測定結果からは、振動締固め時間の増加に伴い、空気量の減少が確認されたものの、微細な気泡の残存率が高く、気泡間隔係数も低い値を示している。しかし、超音波伝播速度から求めた相対動弾性係数は、気泡分布とは相反する結果となった。その要因として、本試験で測定した断面が、振動締固めにより供試体上部に移動したエントレインドエアが多く存在する部分であった可能性が考えられる。ここで、図10に振動締固め時間0sと180sの供試体断面を示す。振動締固め時間の増加に伴い、供試体上層部にはセメントペーストが多く、下層部には粗骨材が多く分布していることが確認できる。本実験の気泡分布測定では、振動締固め時間によらず切断位置を打設面から5cmの位置の断面に一律で定めた。これが、気泡分布と相対動弾性係数の傾向が異なった要因であると考えられる。そのため、気泡分布測定を行う際には、供試体の切断位置によって測定面の状態に差が生じることに留意し、測定位置を決定しなければならないことが明らかとなった。

まとめ

本実験では、振動締固め時間がコンクリート中の空気量と凍結融解抵抗性に及ぼす影響について検討を行った。本実験の範疇で得られた知見を以下に示す。

- (1) 設計空気量6.0%のコンクリートは、振動を180s以上加えた場合であっても、2.0%程度しか減少せず耐凍害性に有効な空気量が連行されることが確認された。
- (2) 超音波伝播速度から求めた相対動弾性係数は、振動締固め時間の増加による空気量減少に伴い、低下することが確認された。このことから、減少した空気にはエントレインドエアが一定量混入して

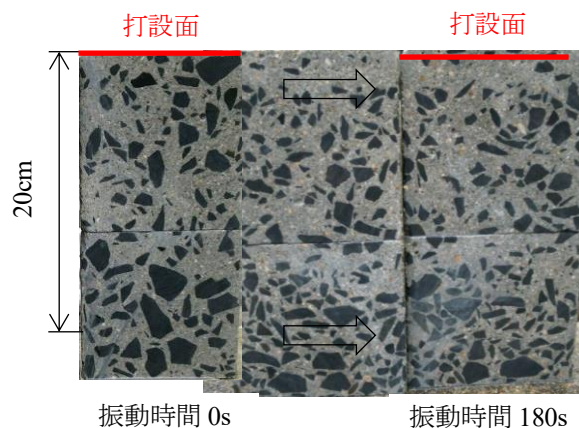


図10 円供試体の断面

いることが考えられ、長時間の振動締固め時間は凍結融解抵抗性に影響を及ぼすことが確認された。

- (3) 質量減少率は最大で2%程度と低く、供試体の外観は表層のペースト部分のみでスケーリングが進行していた。このことから、表面の劣化であるスケーリングに対して、振動締固め時間の増加は、影響度合いが小さいことが確認された。
- (4) 振動締固め時間の増加によるコンクリート内の骨材の分布の変化は、圧縮強度試験や気泡分布測定に影響を及ぼすことが示唆された。

参考文献

- 1) 全国コンクリート製品協会東北支部，コンクリート二次製品技術研究会実験結果報告書（プレキャストコンクリート製品の早期劣化に影響を及ぼす製造的要因の研究），（2011）
- 2) 高橋和雄，コンクリート製品の振動による空気量の減少について—コンクリート製品の凍結融解作用に対する耐久性に関する研究（Ⅴ）—，農業土木学会論文集，Vol.143，pp.69-77，（1989）
- 3) 片平博ら，振動締固めが凍結融解・スケーリング抵抗性に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.999-1004，（2016）
- 4) 笹井英志ら，コンクリート製品の空気量および凍結融解抵抗性におぼす影響，土木学会第58回年次学術講演会，pp.409-410，（2003）
- 5) 緒方英彦ら，超音波によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価，コンクリート年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1563-1568，（2002）
- 6) 坂田昇ら，中庸熱フライアッシュセメントを用いたコンクリートの耐凍害性に関する研究，Vol.35，No.1，pp.895-900，（2013）