

論文 プレキャストコンクリートの細孔構造に及ぼすダブルミキシングの影響

金井 浩平^{*1}・松村 仁夫^{*2}・田澤 榮一^{*3}・笠井 哲郎^{*4}

要旨：振動締固め成形法で製造されるプレキャストコンクリートでは、ジャンカや表面気泡（あばた）等の不具合を防止するため各種振動機で過度に振動を与えられる場合があり、コンクリート中の空気量の減少に伴い耐凍害性が低下することが指摘されている。本研究ではプレキャストコンクリート製造時の空気量低減を抑制する方法としてダブルミキシング（DM）を提案し、その有効性について検討した。その結果、DMでコンクリートを練混ぜることで、振動締固めによるコンクリート中の空気量の減少および耐凍害性に寄与する気泡間隔係数の増加を低減できることが判明した。

キーワード：ダブルミキシング、プレキャストコンクリート、空気量、気泡間隔係数、振動締固め

1. はじめに

コンクリート製品工場におけるプレキャスト部材の製造においては生産性の向上を目的として通常、常圧蒸気養生を実施している。この常圧蒸気養生は、型枠にコンクリートを打設後、所定の前置時間を取った後、蒸気の通気により緩やかに温度を上げ、最高温度を一定時間保持して行われる。現在、このプレキャストコンクリートの製造工程において、さらなる生産性の向上やコスト削減の観点から、コンクリートの力学特性や耐久性などの品質を損なうことなく、養生時間を短縮することが求められている^{1),2)}。

一方、セメントペーストの製造において、練混ぜ水を最適比率で分割し、練り混ぜるとセメントペーストのブリーディングは大幅に減少する。この練混ぜ方法は、練混ぜ水を一括投入して行う従来の練混ぜ方法（シングルミキシング(SM)）に対し、ダブルミキシング(DM)と呼ばれ、これまで多くの研究が行われてきた^{3),4)}。また、DMはブリーディングが減少するだけでなく、セメントの初期水和が促進することから^{5),6)}、これを常圧蒸気養生するプレキャストコンクリートの製造に適用すると、SMの場合より脱型直後だけでなく、材齢7日および28日の場合とも圧縮強度が大きくなる⁷⁾。更に、DMで製造したコンクリートの凍結融解抵抗性がSMで製造したものより大幅に向上することを報告した⁸⁾。しかし、実験室内で製造したコンクリート供試体（突き棒を用いての打込み）では、凍結融解の繰返しによる相対動弾性係数のSMとDMの明確な差は再現できなかった⁹⁾。プレキャストコンクリート工場では、型枠の形状などに応じて振動台や内部振動機あるいは型枠振動機等の振動機を使用

し、コンクリートの締固めを行っている。しかし、ジャンカや表面気泡（あばた）等の不具合を防止するため振動機の過剰な使用により空気量が減少し、凍害性などに大きく影響することが指摘されている^{10),11)}。以上のことから、前述の工場と実験室での差は、供試体製造時の締固めの程度により、供試体内の凍結融解抵抗性に有効な空気量に差が生じたことが一要因であると推察される。

そこで、本研究ではプレキャストコンクリートの製造時の振動締固めの影響を明確にするために、以下の手順で検討を行った。まず、プレキャストコンクリートの実機製造ラインにおける鋼製型枠の振動加速度を計測し、SMおよびDMで練混ぜたコンクリートを実機と同程度となる加速度の振動で締固める方法と、JISの突き棒を用いて行う方法で供試体を製造する。これらの供試体に関し、締固め条件の相違による圧縮強度、および細孔構造等の変化を測定し、プレキャストコンクリートの耐凍害性における、DMの有効性をより明確にすることを目的とした。

2. 実機製造工程における振動締固め特性

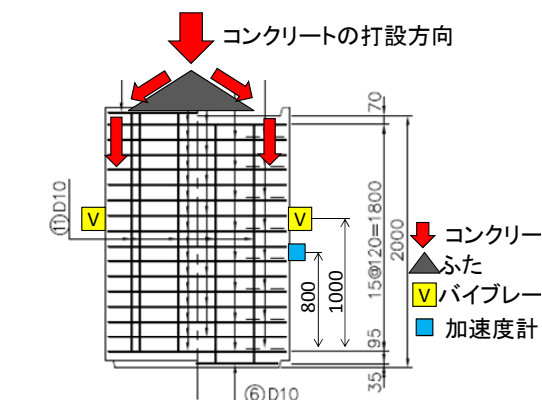
ここでは3章以降の室内実験におけるコンクリート供試体締固め時の振動条件を定めるために、実工場での一般的な振動締固め成形法で製造される製品に関し、その一例として調査を行った。図-1は、製造時の型枠の振動特性を計測した調査対象実製品（ボックスカルバート）の側面図と断面図である。図に、型枠パイプレータ（左右2機）と振動特性を測定する加速度計の位置およびコンクリートの打設方向を示す。型枠パイプレータは、E社製・高周波振動モータ（出力：550W、周波数：100～

*1 東海大学大学院 工学研究科土木工学専攻（学生会員）

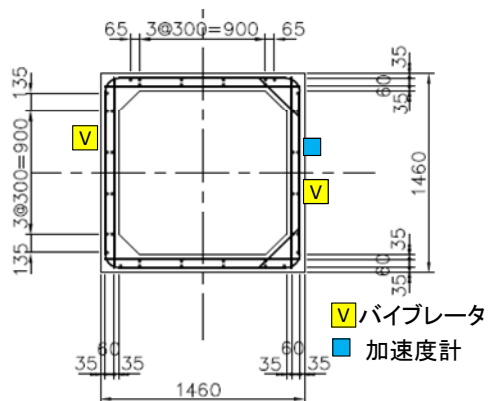
*2 足利工業大学 工学部 創生工学科建築・社会基盤学系（正会員）

*3 広島大学 名誉教授 工博（正会員）

*4 東海大学 工学部土木工学科 教授 工博（正会員）



(a) 側面図



(b) 断面図

図-1 対象実製品(ボックスカルバート)

240Hz, 最大遠心力: 8.83kN) を周波数 210Hz として, 2 機同時に使用した。加速度計は, T 社製(容積: 2000m/s², 応答周波数範囲: 0~2100Hz)を使用し, コンクリートの打設高さが 10cm 程度となった後から加速度の測定を実施した。打設には約 10 分程度を要し, この間上記の条件で振動締固めが行われた。

図-2 は, 実機コンクリート製品製造時の型枠の加速度を測定した結果である。図より, 加速度はコンクリートの打設の進行に伴い徐々に低減しているが, 概ね±

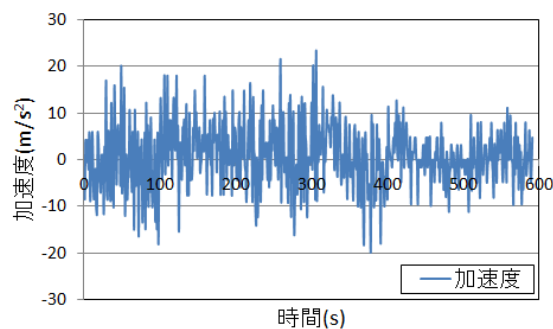


図-2 コンクリート製品工場の加速度

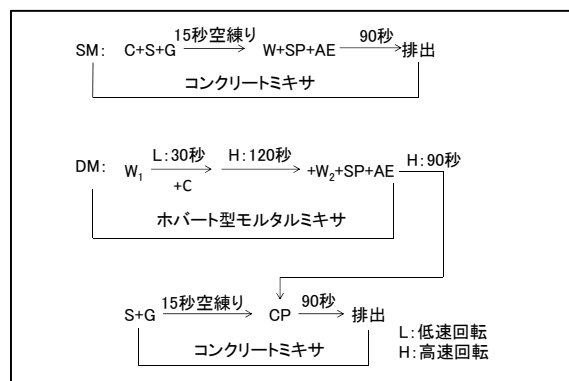


図-3 練混ぜ方法

20m/s² となった。これより, 以下の室内試験において, 供試体成形時の振動締固めにおける, 型枠の加速度を± 20m/s² 程度となるように定めた。

3. 実験概要

3.1 コンクリートの使用材料および配合

使用材料を表-1に, コンクリートの配合を表-2に示す。コンクリートの水セメント比は 40%, 55% の 2 水準とし, 粗骨材の最大寸法は 20mm, 目標スランブ値は 10±2.5cm, 空気量は 4.5±1.5% である。混和剤の添加率は水セメント比 40% の場合, SP を 0.5%(C×%), AE を 0.005%(C×%) 添加し, 水セメント比 55% の場合, SP を 0.4%(C×%), AE を 0.007%(C×%) を標準とし, 練混ぜ水に内割りで添加した。なお, スランブに関しては, 空気量への影響を検討

表-1 使用材料

	種 類	記 号	物 性 また は 主 成 分
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度: 3.16 g/cm ³ 比表面積: 3300 cm ² /g
細骨材	菊川支流産山砂	S	表乾密度: 2.59 g/cm ³ 吸水率: 2.18%
粗骨材	青梅産硬質砂岩碎石	G	表乾密度: 2.70 g/cm ³ 吸水率: 0.62% 最大寸法: 20mm
混和剤	高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系化合物
	AE 助剤	AE	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

表-2 コンクリートの配合

No	G _{max} (mm)	目標 スランブ (cm)	目標 空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
						W	C	S	G	SP	AE
1	20	10 ± 2.5	4.5 ± 1.5	40	42	170	425	708	1019	2.13	0.021
2				55		175	318	739	1064	1.272	0.022

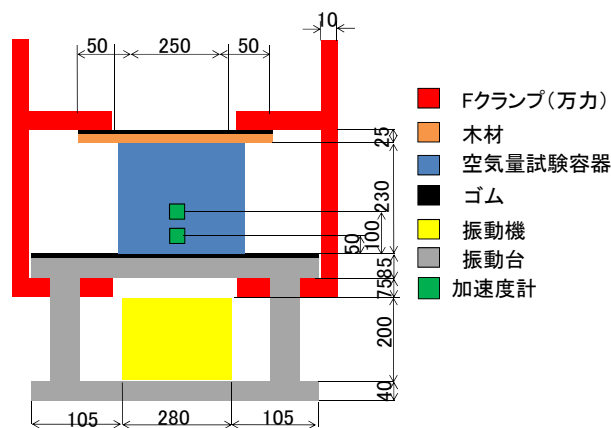


図-4 空気量試験容器固定方法

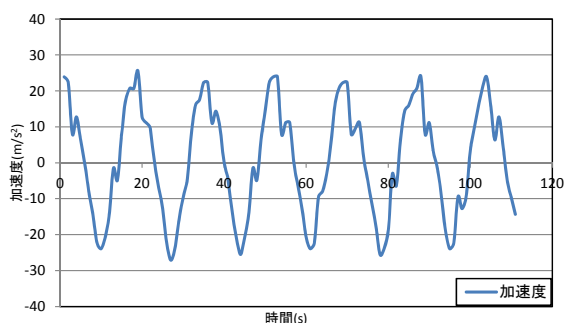
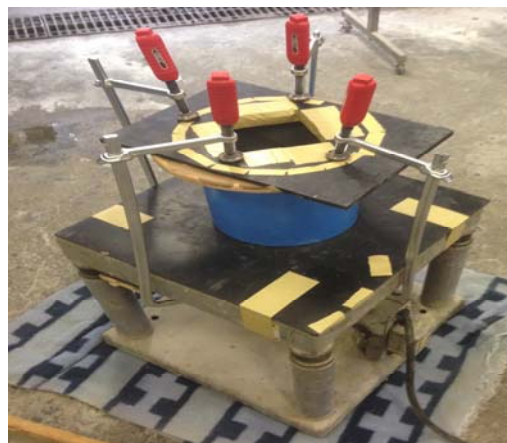


図-5 試験室内で 30Hz の加速度

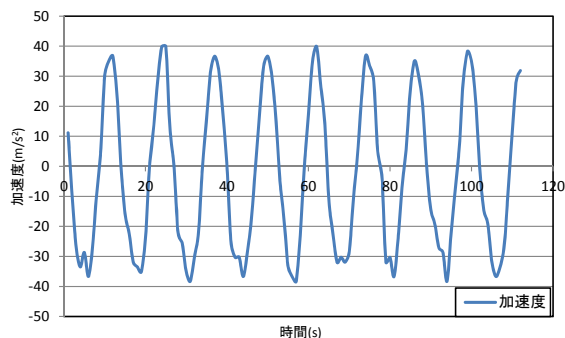


図-6 試験室内で 40Hz の加速度

するために、混和剤の添加量を調整してスランプ値 14cm 程度となるコンクリートも製造した。

3.2 コンクリートの練混ぜ

図-3 にコンクリートの練混ぜ方法を示す。DM におけるセメントペーストの練混ぜはホバート型モルタルミキサ(容量 20 または 30ℓ)を使用した。コンクリートの練混ぜにはパン型強制練りコンクリートミキサ(容積 100ℓ)を用いた。DM における一次水セメント比 (W_1/C) は 24% とした。

3.3 フレッシュコンクリートの試験

スランプ試験を JIS A 1101 に準拠して行った。空気量試験に関しては、JIS A 1128 の空気室圧力方法に準拠して行うが、容器へのコンクリート試料の詰め方は、同 JIS の突き棒を用いる方法と、図-4 に示すテーブル振動機を用いる方法で行った。テーブル振動機を用いる場合は、

図のように容器を振動台(寸法: 450×450mm, 出力: 750W, 電圧: 200V, 全負荷回転速度: 1420rpm(50Hz の場合), 全負荷電流 3.9A(50Hz の場合))に固定し、振動を加えながら 1 分間でコンクリート全量を容器に投入した後、更に 1 分間振動を加えて行った。テーブル振動機への入力周波数に関しては、30Hz と 40Hz とした。図-5 および図-6 は空気量試験にて容器をテーブル振動台に固定後、コンクリート投入間の容器の加速度を測定した結果である。図より、30Hz では加速度が概ね $\pm 23\text{m/s}^2$, 40Hz では $\pm 40\text{m/s}^2$ 程度となった。30Hz の場合、2. で計測した実機製品製造時の型枠の加速度とほぼ同程度であり、以下の室内試験では主に 30Hz の条件での締固めとし、一部 40Hz についても試験を行った。

3.4 試験供試体の形成方法および養生条件

供試体は、圧縮強度試験用 ($\phi 10 \times 20\text{cm}$) と細孔構造の評価試験用 ($10 \times 10 \times 40\text{cm}$) を作製した。両供試体とも JIS A 1132 に準拠し、突き棒を用いる場合と振動台式振動機を用いる場合で作製した。圧縮強度用供試体における振動台式振動機を用いる場合では、前述の空気量試験と同一のテーブル振動機を使用し、2 層に分け各層 10 秒間型枠を振動台に押し当てて締固めを行い、木槌で叩きながら上面をならして成形した。細孔構造の評価試験用供試体における振動台式振動機を用いる場合では、図-7 に示すように、上記の振動機に型枠を固定し、振動を加えながら 30 秒間で連続してコンクリートを投入した後、更に 30 秒間振動を加えて締固めを行い、上面をならして成形した。両供試体とも 24 時間後脱型し、標準養生 ($20 \pm 1^\circ\text{C}$ の水中養生) を行った。圧縮強度試験は材齢 7, 28 日で行い、同一条件の供試体 3 本の試験値の平均で評価した。細孔構造の評価試験用供試体は、28 日の水中養生後、更に概ね 1 ヶ月間気中養生(室温 $20 \pm 1^\circ\text{C}$, 湿度 65%) し、細孔径分布および気泡間隔係数の測定用に成形した。

3.5 コンクリートの細孔構造の評価試験

気泡間隔係数の測定は ASTM C 457 リニアトラバース

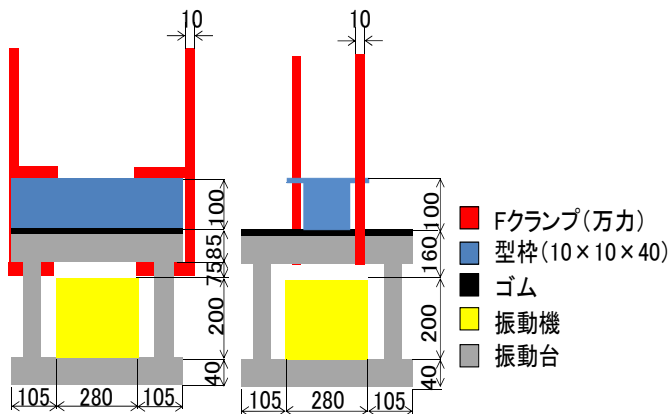


図-7 型枠固定方法

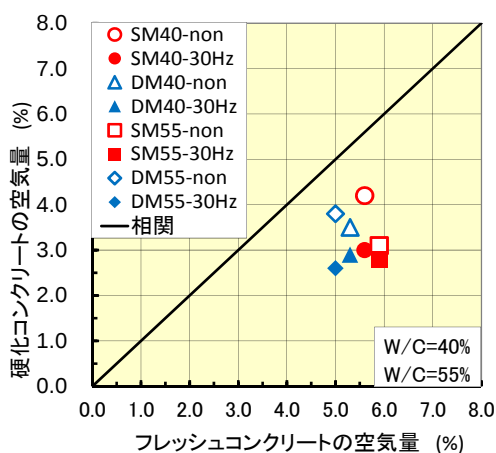


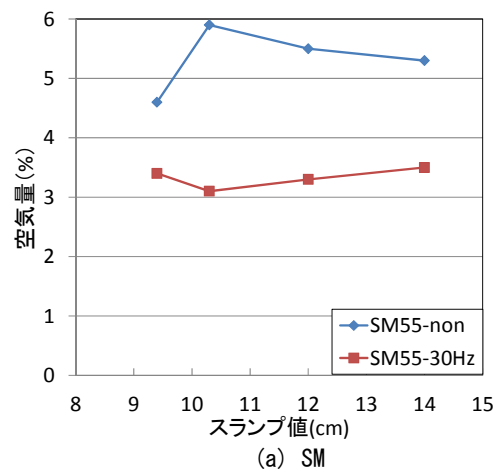
図-8 フレッシュおよび硬化後のコンクリートの空気量の相関

法に準じて行った。測定用の試料は評価試験用供試体を幅 20mm に切断し(試料寸法: 100×100×20mm), 切断面を研磨後, 110℃で 1 日乾燥させ作製した。細孔径分布の測定は, ポロシメータを使用し, 水銀圧入法にて行った。測定用の試料は, 評価試験用供試体の端から 1/3 程度切断し, 中心部分から 3~5mm のモルタル部の破片(3~4 個)を採取し 2 日間アセトンに浸漬させた後, 7 日間真空乾燥させて作製した。測定容器(セル)の容積は 3ml である。

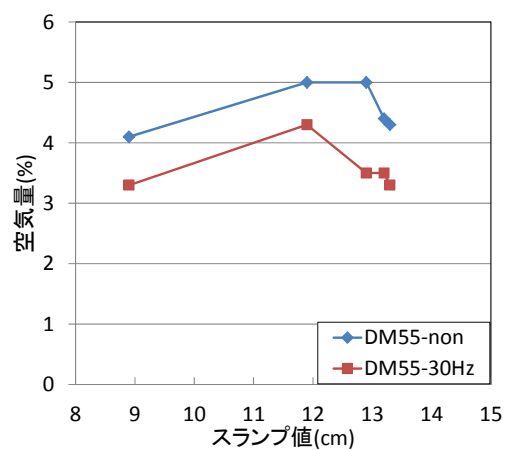
4. 実験結果および考察

4.1 コンクリートの空気量

図-8 は, 突き棒を用いる方法でのフレッシュコンクリートの空気量とテーブル振動機により成形した硬化コンクリートの試料をリニアトラバース法で測定した空気量との相関を示したものである。なお, 図の凡例 SM40-30Hz(-non)は, 順に練混ぜ方法と W/C-成形方法(テーブル振動機の入力周波数(-non:突き棒による成形))を示す。また, 白抜きが振動締めめなし, 塗りつぶしが振動締めめありを示している。図より, 全て硬化コンクリートの空気量はフレッシュコンクリートのそれより小さ



(a) SM



(b) DM

図-9 フレッシュコンクリートの試験結果

くなり, また, 振動締めめを行った方が-non の場合よりその傾向が顕著に現れている。これは, 振動締めめによるコンクリート中の空気泡の脱泡が主要因であると考えられる。また, DM と SM を比較した場合, 硬化後のコンクリートの空気量の減少は, SM40-non を除いて DM の方が小さくなる傾向が認められる。

図-9 は SM および DM で練混ぜた W/C55%のコンクリートに関して, 空気量試験用容器へのコンクリート試料の詰め方を, 突き棒を用いる場合とテーブル振動機を

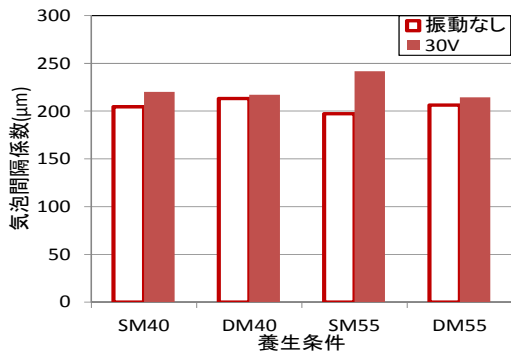
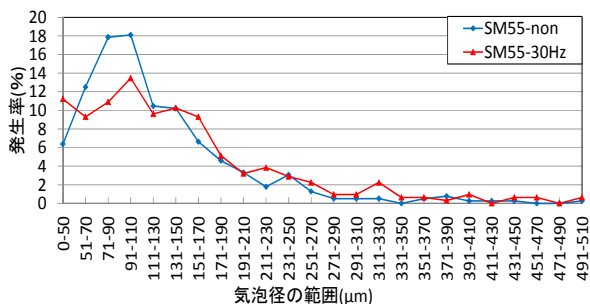
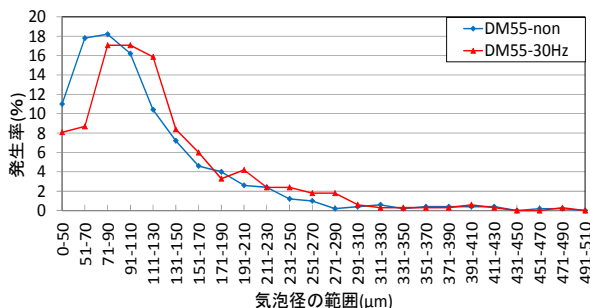


図-10 気泡間隔係数



(a) SM



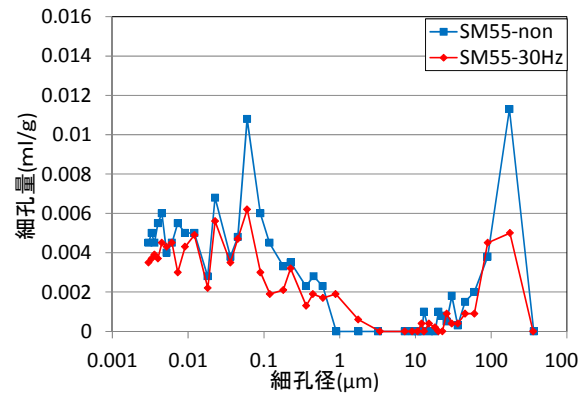
(b) DM

図-11 気泡径の範囲とその発生率

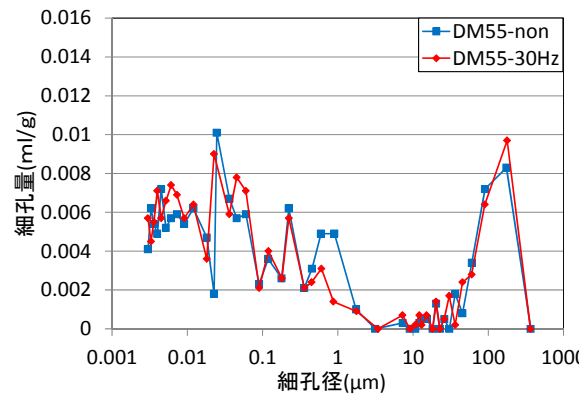
用いる場合で測定した空気量を示したものである。図より、振動締固めにより SM および DM とも空気量が減少しているが、その減少量は SM で 2%、DM では 1%程度の減少となり、DM の方が空気量の減少が小さくなっている。これらの傾向はスランプ値 8~15cm の範囲ではほぼ同程度であり、スランプの影響は小さい。また、DM による空気量の減少量の低下は、プレキャストコンクリートにおいて、DM で製造したコンクリートの凍結融解抵抗性が SM で製造したものより向上したこと⁸⁾の主要因であると考えられる。なお、今後凍結融解試験を実施し、空気量との関係を検討する必要がある。

4.2 細孔構造

図-10 はリニアトラバース法で測定された気泡間隔係数の測定結果を示す。一般に十分な凍結融解抵抗性が得られる気泡間隔係数は、200-250μm 以下とされている^{12),13)}。図より、SM および DM の気泡間隔係数は、全体にこの値の範囲内となり、振動締固めの影響に着目すると、SM は振動締固めをすることで気泡間隔係数が増加



(a) SM



(b) DM

図-12 細孔径分布

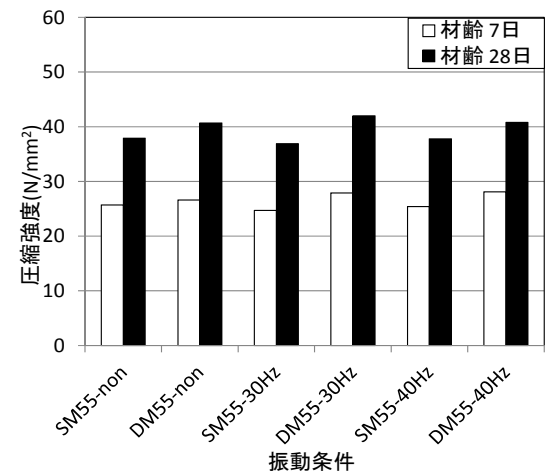


図-13 コンクリートの圧縮強度

し、SM55 で最も変化が大きくなっている。また、DM では SM に比べ、どの水セメント比でも振動締固めによる気泡間隔係数の増加が低減している。以上より、過度な振動締固めが行われた場合でも、DM で練混ぜることで耐凍害性に寄与する気泡間隔係数の増加を低減でき、プレキャストコンクリートの製造において、DM での練混ぜが耐凍害性の向上に有効であることを示唆するものである。

図-11 はリニアトラバース法で測定された弦長を気泡径とし、その気泡径を 0-50μm、それ以降 510μm まで 20μm の範囲の気泡径ごとに気泡の個数を全気泡数で除

して、各気泡径範囲における気泡発生率として示したものである。図より、DM で練混ぜることで小さい範囲(0-90 μ m)の気泡発生率は SM よりも高くなり、大きい範囲(130-210 μ m)の気泡発生率は低くなっている。また、振動締固めによる各気泡径範囲における気泡発生率を比較すると、SM では振動を加えることで 70-130 μ m の気泡発生率が大幅に低下し、それより大きい気泡径の発生率が増加した。しかし、DM では SM で見られた各気泡範囲における気泡発生率の大幅な低下は見られず、SM よりも振動締固めによる大きい範囲の気泡発生率の増加は小さくなった。

図-12 は SM, DM で練混ぜたコンクリートの細孔径分布の測定結果を示したものである。SM, DM とともに細孔径 1 μ m 以下の細孔量が多くなった。また、SM では振動締固めを行うことで細孔径 1 μ m 以下の細孔量が減少した。しかし、DM では振動締固めによる細孔量への影響はほとんど認められない。

4.3 圧縮強度

図-13 は入力周波数 30Hz, 40Hz で振動締固めにより成形した場合と突き棒で成形した場合における、SM および DM のコンクリートの圧縮強度を示したものである。図より、各材齢においても SM に比べ DM の方が圧縮強度は大きくなった。これはこれまでも報告されている通り、DM によりブリーディングが少なくなったこと、および初期水和が促進されたことが主要因であると考えられる。また、振動締固めの影響としては、振動を加えることで SM, DM とともに僅かに圧縮強度が大きくなった。これは、振動締固めにより突き棒を用いる場合よりもコンクリートがより緻密に締固められたためと考えられる。

5. まとめ

本研究の範囲内で以下の結論が得られた。

- (1)振動締固めによりフレッシュコンクリートの空気量は減少する。また、SM より DM の方が空気量の減少が小さく、DM で練混ぜることで硬化後のコンクリートの空気量の変化を低減できる。
- (2)DM で練混ぜることで、振動締固めによる硬化コンクリートは SM に比べ凍結融解抵抗性に寄与する気泡間隔係数の増加が低減した。また、DM では振動締固めによる細孔径への影響が小さい。
- (3)SM および DM で練混ぜたコンクリート圧縮強度は、振動締固めを行うことでコンクリート内部が緻密になり圧縮強度が増加する。また、DM では、各材齢において、SM より圧縮強度が大きい。

以上のことから、ダブルミキシングはプレキャストコンクリートの製造において、過度の振動締固めによる耐凍害性の低下を軽減するのに有効な練混ぜ方法であるこ

とが明らかになった。

参考文献

- 1) 新田智博ほか：蒸気養生を行った加圧成形コンクリートの強度性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19, No.1, pp.637-642, 1997
- 2) 田所龍雄，松崎勇二，友竹博一：コンクリート製品の生産性向上に関する実験的研究，土木学会第 65 回年次学術講演会，pp.1349-1350, 2010
- 3) 田澤榮一ほか：ダブルミキシングで作製したセメントペーストの諸物性について，コンクリート工学年次講演会論文集，pp.125-128, 1982
- 4) 田澤榮一，笠井哲郎：フレッシュセメントペーストのダブルミキシング効果，土木学会論文集，第 396 号/V-9, pp.135-142, 1988
- 5) 笠井哲郎ほか：ポリマーおよびシリカフュームをダブルミキシングで混入したセメントペーストの水和特性，広島大学工学部研究報告第 37 巻，第 1 号，pp.31-37 巻，1988
- 6) 中川好正ほか：ダブルミキシングがセメントの初期水和反応に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29, No.1, pp.51-56, 2007
- 7) 笠井哲郎，田澤榮一，磯貝寛幸：常圧蒸気養生で製造するコンクリート製品へのダブルミキシングの適用に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.1, pp.2185-2190, 2009
- 8) 鈴木翔太ほか：ダブルミキシングで製造したプレキャストコンクリートの耐凍害性と細孔構造に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.36, No.2, pp.355-360, 2014
- 9) 鈴木翔太ほか：プレキャストコンクリートの耐凍害性向上へのダブルミキシングの有効性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.36, No.2, pp.433-438, 2015
- 10) 坂ノ上宏ほか：コンクリート製品の空気量および凍結融解抵抗性に及ぼす影響その 2 硬化後の空気量測定および凍結融解試験，土木学会第 58 回年次学術講演会，pp.409-410, 2003
- 11) 笠井英志ほか：コンクリート製品の空気量および凍結融解抵抗性に及ぼす影響その 1 振動機の締固め時間とフレッシュ時の空気量，土木学会第 58 回年次学術講演会，pp.411-412, 2003
- 12) 木村順哉ほか：エコセメントを用いた舗装用超硬練りコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.34, No.1, pp.1486-1491, 2012
- 13) 長谷川寿夫，藤原忠司：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 凍害，技報堂出版，pp.62-68 1998