

論文 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

鈴木 翔太*1・田澤 榮一*2・Jariyathitipong Paweena*3・笠井 哲郎*4

要旨: 練混ぜ水を最適比率で分割し、先にセメントペーストを練り混ぜるダブルミキシング(DM)を用いると、セメントペーストのブリーディングが大幅に減少するだけでなく、その初期水和反応が促進されることから、常圧蒸気養生するプレキャストコンクリート製造における養生工程を短縮できる。本研究では、DMで製造したプレキャストコンクリートの耐凍害性について検討した。その結果、従来の練混ぜ方法で製造した場合に比べ、凍結融解抵抗性が大幅に向上することが明らかとなった。また、耐凍害性に影響する細孔構造や気泡間隔係数に差がみられた。

キーワード: ダブルミキシング, 常圧蒸気養生, 凍結融解抵抗性, 細孔径分布, 気泡間隔係数

1. はじめに

現在のプレキャストコンクリート工場におけるプレキャスト部材の製造において、生産性の向上のために、促進養生として常圧蒸気養生がその殆どで採用されている。この常圧蒸気養生条件は、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)~5)}。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^{6),7)}、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り、プレキャストコンクリートの製造における養生工程、特に前置時間の短縮に有効であることが明らかとなった⁸⁾。

本研究では、常圧蒸気養生したプレキャストコンクリートの耐凍害性を明らかにするとともに、耐凍害性の向上を指向してその製造にDMの適用を試みた。まず、プレキャストコンクリートの実機製造ラインにてSMおよびDMで製造し、蒸気養生したコンクリート供試体の圧

縮強度試験および凍結融解試験を行った。この結果を踏まえ、試験室内でSMおよびDMで製造し、蒸気養生したコンクリート供試体の凍結融解試験および細孔径分布と気泡間隔係数を測定し、これらの結果から耐凍害に及ぼすDMの有効性について検討した。

2. 実験概要

2.1 実機製造ライン実験

(1) 使用材料および配合

セメントには普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³, 比表面積3300cm²/g)を使用した。細骨材はそれぞれ岡山県産の砕砂(表乾密度2.56g/cm³, 吸水率1.47%)および砕石(表乾密度2.61g/cm³, 吸水率0.98%)を使用した。混和剤にはポリカルボン酸系高性能減水剤(SP)とAE助剤(AE)を使用した。実機製造ライン実験のコンクリートの配合を表-1に示す。設計基準強度は30N/mm²である。なお、粗骨材の最大寸法は15mm、目標スランプは8±2.5cm、空気量は4.5±1.5%である。

(2) コンクリートの練混ぜおよび供試体

コンクリートの練混ぜは、実機プラント(図-1)を用いSMおよびDMにて行った。DMではオムニミキサにてセメントペーストを製造した後、これを細骨材とともにコンクリートミキサに投入し、90秒間練混ぜてコンクリートを製造した。DMのセメントペーストの製造は、練混ぜ水を2分割して練り混ぜる方法で、練混ぜ水

表-1 実機コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
		W	C	S	G	SP	AE
40	42	170	425	702	985	2.55	0.0425

*1 東海大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

*2 広島大学 名誉教授 工博 (正会員)

*3 ランデス(株) 本部技術センター研究所 (正会員)

*4 東海大学 工学部土木工学科 教授 工博 (正会員)

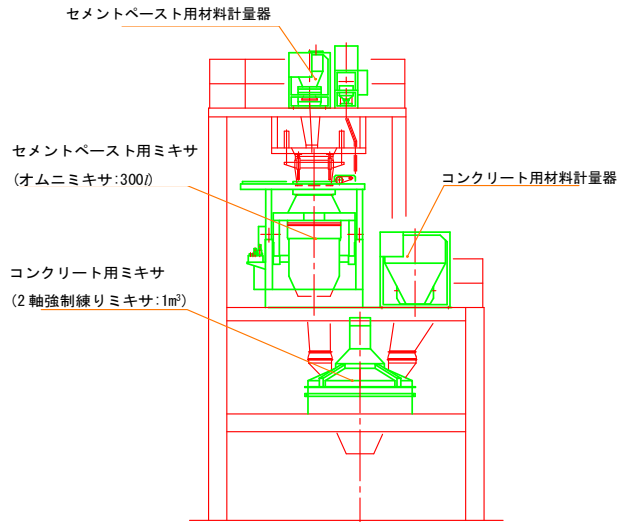


図-1 実機プラントの概念図

の一部（一次水： W_1 ）を添加して、練り混ぜた後、水の残部（二次水： W_2 ）と混和剤（SPとAE）を加え練り混ぜた。なお、DMにおける一次水セメント比（ W_1/C ）は24%とした。この値（最適 W_1/C ）は、DMにおいてブリーディングが最も小さく、セメントの初期水合が促進する条件である³⁾⁻⁸⁾。SMでは、コンクリートミキサに材料を一括投入し、90秒間練り混ぜた。供試体は圧縮試験用として、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ および凍結融解試験用として、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ をそれぞれ必要本数作製した。

(3) 養生条件

常圧蒸気養生は、実機の恒温恒湿槽を用いて前置時間を0, 2, 5時間（室温 20°C ）と変化させ、蒸気の通気により昇温速度を 20°C/h 、最高温度を 60°C 、最高温度保持時間を3hとなるように設定した。常圧蒸気養生終了後の供試体は、所定の試験材齢まで室温 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度65%の条件で気中養生した。なお、SMおよびDMで製造した供試体は、前置時間を変えたそれぞれの恒温恒湿槽で同時に養生を行った。

(4) 試験項目および方法

スランブ試験、空気量試験、圧縮強度試験および凍結融解試験（A法）をJISに準拠して行った。なお、圧縮強度試験の材齢は1, 24日とした。また、凍結融解試験では材齢24日まで気中養生した後、28日まで水中養生（ 20°C ）し、試験に供した。同一条件の供試体本数は、圧縮強度試験で3本、凍結融解試験では2本とした。

2.2 試験室内実験

(1) 使用材料および配合

セメントには普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm^3 、比表面積 $3300\text{cm}^2/\text{g}$ ）を使用した。細、粗骨材はそれぞれ菊川支流産の山砂（表乾密度 2.59g/cm^3 、吸水率2.18%）、青梅産硬質砂岩砕石（表乾密度 2.70g/cm^3 、

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)					
		W	C	S	G	SP	AE
40	42	170	425	708	1019	2.13	0.021

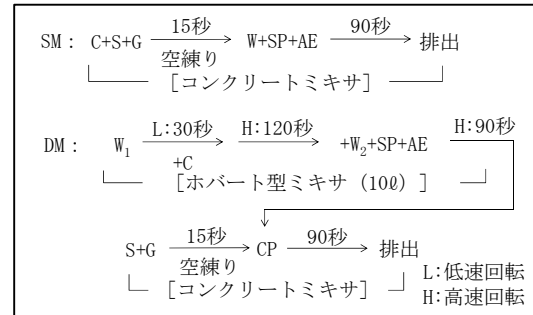


図-2 練混ぜ方法

吸水率0.62%)を使用し、混和剤は、実機製造ライン実験と同一のものを用いた。なお、粗骨材の最大寸法は 20mm 、目標スランブは $8 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ である。また、混和剤は練混ぜ水に対して内割で添加した。試験室内実験のコンクリートの配合を表-2に示す。

(2) 練混ぜ方法および供試体

コンクリートの製造は図-2に示す練混ぜ方法にて行った。DMにおけるセメントペーストの練混ぜにはホバード型モルタルミキサ（容量 10l ）を使用した。コンクリートは、パン型強制練りコンクリートミキサ（ 100l ）を用いた。DMにおける一次水セメント比（ W_1/C ）は実機の場合と同様に24%とした。コンクリートの型枠への打込みは、JIS A 1132の突き棒を用いる場合に準拠して行った。供試体は圧縮試験用として、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ および凍結融解試験用として、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ をそれぞれ必要本数作製した。

(3) 養生条件

コンクリート供試体の養生は標準養生および常圧蒸気養生にて行った。標準養生は水温 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の水中養生、常圧蒸気養生は恒温恒湿槽を用いて前置時間を0, 3h（室温 20°C 、湿度65%）と変化させ、昇温速度を 20°C/h 、最高温度を 65°C 、最高温度保持時間を3h（室温 65°C 、湿度98%）とした。常圧蒸気養生終了後の供試体は、所定の材齢まで室温 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度65%の条件で気中養生した。

(4) 試験項目および方法

試験項目は実機製造ライン試験同様、スランブ試験、空気量試験、圧縮強度試験および凍結融解試験（A法）をJISに準拠して行った。圧縮強度試験の材齢は1, 3, 14, 28日とした。また、凍結融解試験では材齢24日まで気中養生した後、28日まで水中養生（ 20°C ）し、試験に供した。同一条件の供試体本数は、圧縮強度試験お

表 - 3 フレッシュコンクリートの試験結果

練混ぜ方法	外気温 (°C)	コンクリート温度 (°C)	空気量 (%)	スランプ値 (cm)	単位容積質量 (kg/m ³)
SM	30.3	29.0	4.8	8.0	2276
DM	30.3	27.9	4.3	8.0	2263

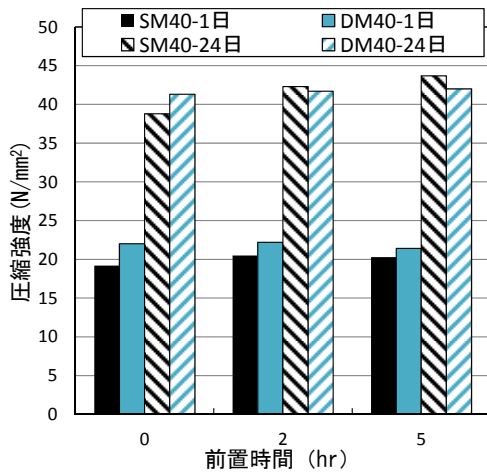


図 - 3 コンクリートの圧縮強度試験結果

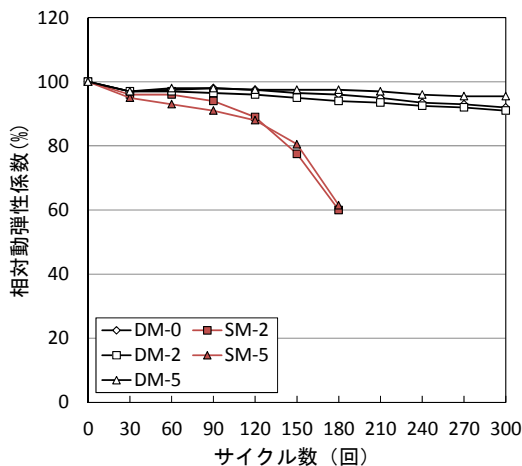


図 - 4 凍結融解サイクルに伴う相対動弾性係数の変化

および凍結融解試験とも3本とした。気泡間隔係数の測定は、ASTM C 457 リニアトラバース法に準じて行った。細孔径分布の測定は、水銀圧入法にて行った。両試験の供試体は、凍結融解試験に用いる供試体と同一の製造・養生条件のものとした。

3. 実験結果および考察

3.1 実機製造ライン実験

(1) コンクリートの基礎物性

表-3は、フレッシュコンクリートの試験結果を示したものである。SMおよびDMともスランプおよび空気量は、目標の範囲となった。

図-3はSMおよびDMで製造し、前置時間を0~5時間と変化させて蒸気養生したコンクリートの圧縮強度試験結果を示したものである。図より、材齢1日お

び24日ともSMでは前置時間2, 5時間に比べ~時間では圧縮強度が短いほど小さくなっているが、DMでは前置時間の短縮による強度低下が見られず、また材齢1日では、どの前置時間においてもSMよりDMの方が圧縮強度が大きくなった。これは前置時間が短い場合、コンクリート中の気泡や練混ぜ水が昇温に伴い熱膨張し、蒸気養生の初期段階で硬化体内部に微細ひび割れ等の欠陥が生じているためであると推察される⁸⁾。一方、DMの脱型直後の圧縮強度には前置時間の影響が殆ど現れていない。これはDMの方がSMより凝結が速いため、前述のような内部欠陥が生じにくいからであると推察される⁸⁾。このことは強度発現性を損なうことなく、常圧蒸気養生工程における前置時間を短縮する方法として、DMが有効であることを示すものであり、文献8)の結果と一致する。

(2) 凍結融解性試験

図-4は、SMおよびDMで製造し、前置時間を0~5時間と変化させて蒸気養生したコンクリートの凍結融解サイクルに伴う相対動弾性係数の変化を示したものである。なお、図中の記号SM40-0は、SMで製造し、W/C40%で蒸気養生における前置時間が0時間(Nは標準養生)等を示し、以下に用いる。図より、DMではいずれの前置時間の条件においても相対動弾性係数の低下は僅かであるのに対し、SMでは前置時間2および5時間の場合ともサイクル回数180回で相対動弾性係数が60%以下に低下した(SMの前置時間0時間は試験を実施していない)。これは、圧縮強度特性でも述べた通り、DMの方がSMより凝結が速いため、蒸気養生過程での温度上昇による内部欠陥が生じにくいからであると推察される。この結果から、強度発現性だけでなく凍結融解抵抗性を損なうことなく、前置時間を短縮する方法として、DMが有効であると考えられる。

3.2 試験室内実験

(1) コンクリートの基礎物性

図-5はSMおよびDMで製造し、標準養生したものおよび前置時間を0, 3時間と変化させて蒸気養生したコンクリートの圧縮強度試験結果を示したものである。図より、蒸気養生した場合3.1の実機製造ラインの結果と同様に、DMの方がSMよりどの試験材齢においても圧縮強度が大きくなった。特に材齢1日において、その傾向が明確に現れている。一方、材齢28日まで標準養生したものはDMよりSMの方が僅かに高い圧縮強度となった。

(2) 凍結融解性試験

図-6, 7はSMおよびDMで製造し、標準養生したものおよび前置時間を0, 3時間と変化させて蒸気養生したコンクリートの凍結融解サイクルに伴う相対動弾性

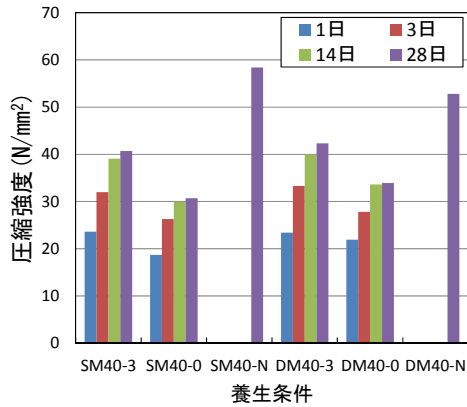


図 - 5 コンクリートの圧縮強度試験結果

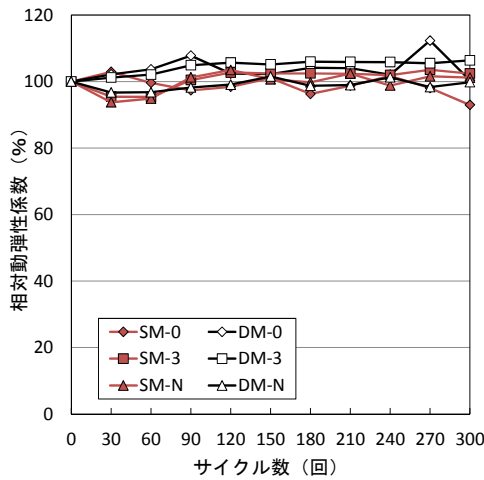


図 - 6 凍結融解サイクルに伴う相対動弾性係数の変化

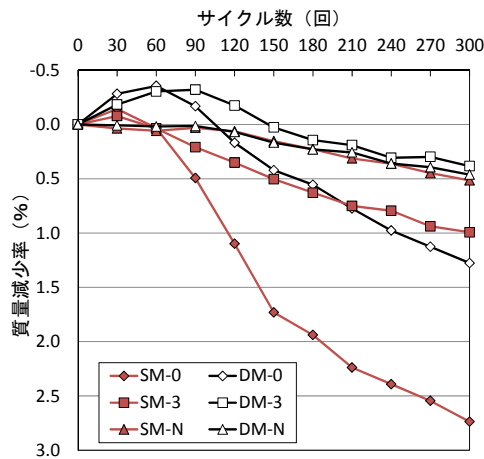


図 - 7 凍結融解サイクルに伴う質量減少率の変化

係数の変化および質量減少率の変化を示したものである。図-6より、練混ぜ条件および養生条件に拘わらず、凍結融解サイクルに伴う相対動弾性係数の低下は見られず、実機製造ラインで生じたSMとDMの差は現れなかった。しかし、図-7に示す様に、凍結融解サイクルに伴う質量減少率は、養生条件が同一のSMとDMを比較すると、SMの方が大きくなった。特にその減少は、前置時間が0時間のSMで大きくなった。これは、圧縮

表 - 4 コンクリートの空気量および気泡間隔係数

記号	空気量 (%)		気泡間隔係数 (μm)	比表面積 (mm^2/mm^3)
	フレッシュ	硬化		
SM40-0	4.6	6.3	323	13.41
DM40-0	4.4	4.9	283	17.91
SM40-3	4.5	4.4	308	17.93
DM40-3	4.5	4.9	286	16.77
SM40-N	4.5	3.9	293	18.40
DM40-N	4.5	5.4	280	18.30

強度特性の結果で述べたことと同様に、十分に凝結が進んでいない状態で蒸気養生過程での温度上昇を受けたために蒸気養生の初期段階で硬化体内部に微細ひび割れ等の欠陥が生じているためであると考えられる。更に、その初期段階でAE剤等で連行されたエントレインドエアが膨張することで、凍結融解抵抗性に有効な空気泡の径や分布が変化したことが原因であると推察される。

以上の結果から、凍結融解サイクルに伴う質量減少の低減(スケーリングの低減)にDMが有効であると考えられる。

(3) 細孔構造

表-4に、フレッシュコンクリートの空気量とリニアトラバース法で測定した硬化コンクリートの空気量、気泡間隔係数等の測定結果を示す。フレッシュコンクリートと硬化コンクリートの空気量を比較すると、SMの前置時間0時間(SM40-0)以外の条件のものは、フレッシュコンクリートと硬化コンクリートの空気量がほぼ同程度となっているが、SM40-0ではフレッシュコンクリートの空気量に比べ硬化コンクリートの空気量が大きく測定されている。これは、蒸気養生時の昇温過程で空気泡が僅かに膨張した状態で硬化したことが一要因であると推察される。気泡間隔係数に関し、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、 $200\text{-}250\mu\text{m}$ 以下とされているが^{9),10)}、本測定値は全体にこの値より大きい値となっている。SMとDMで比較すると、どの養生方法ともSMよりDMの方が気泡間隔係数が小さい値となった。また、DMは養生条件の相違による気泡間隔係数の差は小さいが、SMではSM40-N<SM40-3<SM40-0の順に大きくなっており、前置時間の影響が明確に現れている。これらのことは、DMで製造することで蒸気養生の前置時間を短縮してもSMの場合より気泡間隔係数の増加を抑えることができ、耐凍害性の向上に有効であると判断できる。

図-8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 $0\text{-}50\mu\text{m}$ 、それ以降 $510\mu\text{m}$ まで $20\mu\text{m}$ 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はSMに比べ $90\text{-}190\mu\text{m}$ の気泡径範囲における気泡発生率が高く、大きい範囲の気泡発生率は低くなっている。また、SMに関し養生条件

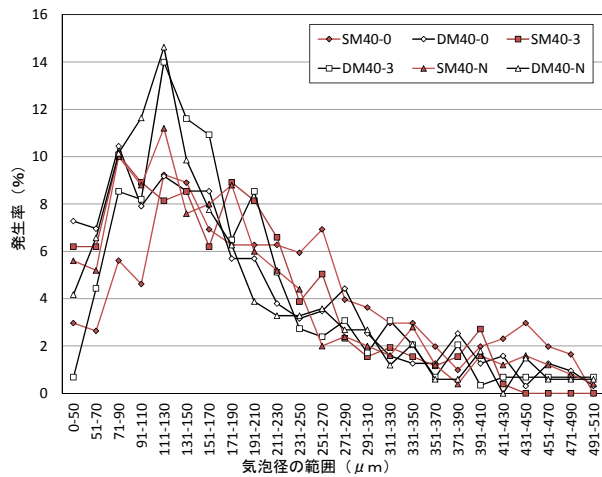


図 - 8 気泡径の範囲とその発生率

の相違による影響を比較すると、SM40-N、SM40-3、SM40-0の順に小さい径の気泡発生率が高くなる傾向を示している。特にSM40-0ではその傾向が顕著である。

図9～11は、SMおよびDMで製造し、各養生条件におけるコンクリートの細孔径分布の測定結果を養生条件ごとに示したものである。図9は標準養生の場合であるが、水和組織に関係する5μm程度以下の細孔径に関しSMとDMで比較すると、細孔量の絶対値は異なるものの、その値がピークとなる細孔径はSM、DMともほぼ一致しており、水和組織に関係する細孔径分布には殆ど差異は見られない。一方、図10、11に示す蒸気養生した場合、前述のピークとなる細孔径の値は、DMよりSMの方が大きく、前置時間の短い0時間の方が3時間より更に明確にその傾向が現れている。図12、13は図9～11の結果を、練混ぜ方法ごとに示したものである。図よりSMでは、標準養生の場合より蒸気養生の場合の方が上記ピークとなる細孔径の値が大きくなっており、更に前置時間が短いほどその値はより大きい方にシフトしている。丸山ら¹¹⁾は、蒸気養生等の高温促進養生したコンクリートは、標準養生の場合よりまた、前置時間が短いほどその水和組織が粗になることを指摘しているが、本検討からも同様な結果が得られた。一方、DMでは上記ピークとなる細孔径の値が標準養生より蒸気養生の方が僅かに大きくなっているが、SMの場合よりその傾向は小さくなっている。これらのことより、蒸気養生により水和組織が粗になる傾向をDMで製造することで低減できるものと考えられる。

以上のことより、常圧蒸気養生するコンクリートをDMで製造することでSMに比べ、コンクリートの細孔構造の内、耐凍害性に関係する気泡間隔係数を小さくでき、また、内部の気泡径や水和組織に関係する細孔径がより小さい径に分布するようになり、DMにより組織が緻密化するものと考えられる。更に、DMの場合、蒸気

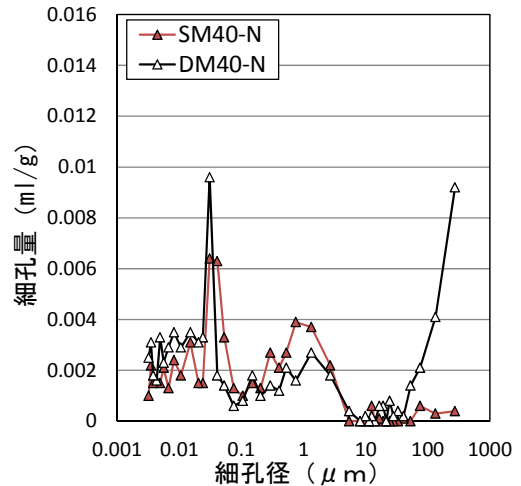


図 - 9 細孔径分布 (標準養生)

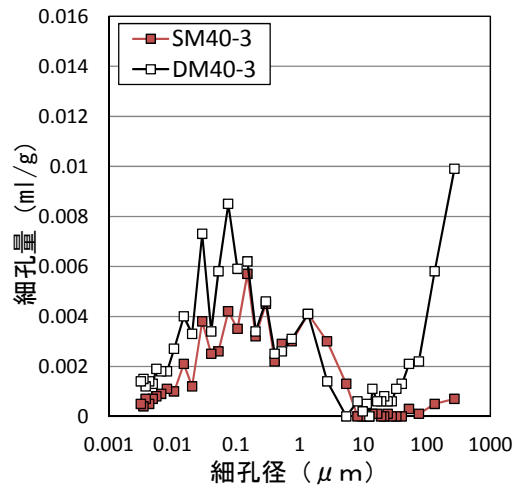


図 - 10 細孔径分布 (前置き3時間)

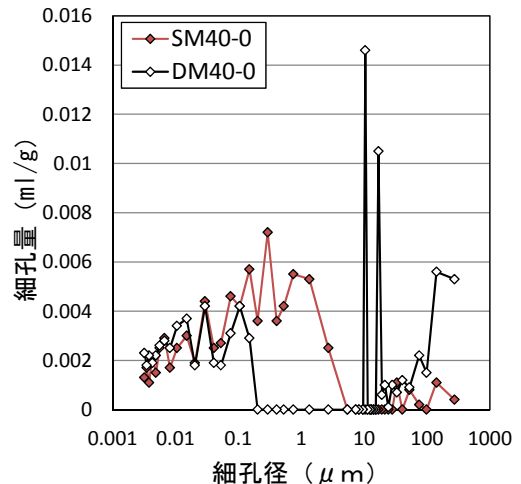


図 - 11 細孔径分布 (前置き0時間)

養生工程における前置時間を短縮しても細孔構造の変化が小さいことから、DMは、耐凍害性等の耐久性を保持しつつ前置時間を短縮する有効な方法であると考えられる。

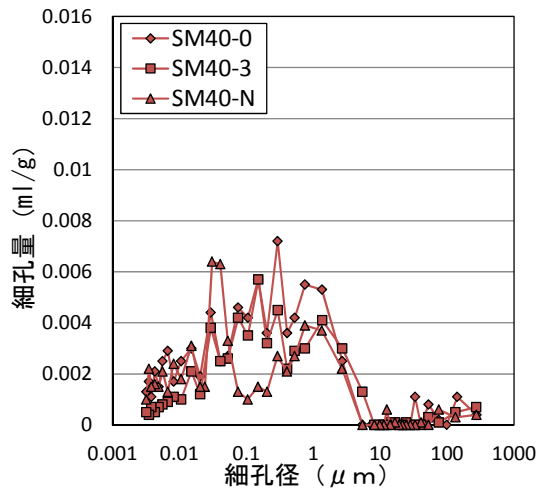


図 - 1 2 細孔径分布 (SM)

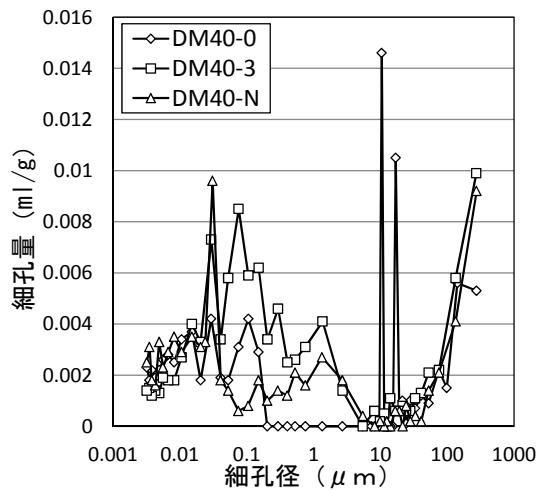


図 - 1 3 細孔径分布 (DM)

4. まとめ

本研究の範囲内で、以下の結論が得られた。

- (1) 常圧蒸気養生したコンクリートの圧縮強度は、DMにおける最適 W_1/C の条件で練り混ぜることで、SMの場合より、材齢1日において大きくなる。また、前置時間の短縮による強度低下はSMの場合より小さくなる。
- (2) 実機製造ラインにおいて、常圧蒸気養生するコンクリートをDMの最適 W_1/C の条件で製造することで、SMの場合に比べ、コンクリートの凍結融解サイクルに伴う相対動弾性係数の低下を大幅に低減できた。また、試験室内でDMおよびSMで製造したコンクリートに関しては、相対動弾性係数の変化には差が見られなかったが、凍結融解サイクルに伴う質量減少率には差が見られ、養生条件が同一のSMとDMを比較すると、DMの方が質量減少率が大幅に小さくなった。
- (3) 常圧蒸気養生するコンクリートをDMで製造することでSMに比べ、コンクリートの細孔構造の内、耐凍

害性に関する気泡間隔係数を小さくでき、また、内部の気泡径や水和組織に関する細孔径がより小さい径に分布するようになり、DMにより組織が緻密化する。更に、DMの場合、蒸気養生における前置時間を短縮しても細孔構造の変化が小さい。

以上のことから、ダブルミキシングは常圧蒸気養生するプレキャストコンクリートの製造における養生工程、特に前置時間の短縮に有効であることが明らかとなった。

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, pp637-642, 1997
- 2) 田所龍雄, 松崎勇仁, 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, pp125-128, 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) 吉岡一弘:セメント粒子の凝集構造に及ぼす鉱物組成ならびに練混ぜ方法の影響, 広島大学学位論文, 1999
- 6) 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
- 7) 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, pp51-56, 2007
- 8) 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, pp2185-2190, 2009
- 9) 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, pp1486-1491, 2012
- 10) 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
- 11) 丸山晃平, 宇治公隆, 上野 敦, 大野 健太郎:蒸気養生条件が相違するコンクリート製品の強度特性および細孔構造に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp571-576, 2011