

論文 コンクリートおよびモルタルの硬化性状に及ぼす初期材齢時の凍結の影響

山下 紘太郎*1・古館 茉由子*2・金 志訓*3・濱 幸雄*4

要旨: 本研究では初期凍害を受けたコンクリートの強度増進性状に関する検討を行うため、AE コンクリートを用いた実験により、初期材齢時の凍結融解が圧縮強度増進に及ぼす影響を確認することとした。さらに、モルタルを用いた実験により、W/C、凍結融解後の養生条件等が強度増進に及ぼす影響を確認することとした。その結果コンクリートでは、凝結始発前後に凍結を受けた場合には、強度増進が停滞することを確認した。モルタルを用いた実験では、凝結終結前後の凍結が強度増進の停滞を引き起こしている可能性が認められ、凍結融解後の強度増進は、封緘養生より水中養生の方が大きい傾向となった。

キーワード: 初期凍害, 凝結時間, 養生方法, 養生温度, 圧縮強度

1. はじめに

寒中コンクリート工事で留意すべきことは、初期凍害の防止と強度増進の遅れに対する対応が挙げられる¹⁾。初期凍害とは、フレッシュ時から硬化初期にかけてコンクリート中の水分が凍結することにより、強度発現の停滞などを引き起こす被害のことである。一般に、十分に硬化したコンクリートが凍結融解の繰返し作用を受けて劣化する凍害とは区別される。

初期凍害の防止策として、一般的に圧縮強度 5.0N/mm² が得られるまでコンクリートを凍結させないような初期養生が必要とされている。このため、構造物を覆う養生囲いや養生上屋を設け、内部を加熱する採暖養生が広く普及している。一方、コンクリートの材料、調合の面からの対策として、AE 剤、AE 減水剤や耐寒促進剤の利用が有効であるとされている。AE 剤、AE 減水剤による気泡の導入は、十分に硬化したコンクリートの凍害の場合と同様に初期凍害の防止に関しても効果がある²⁾。耐寒促進剤は、コンクリートの凍結温度を低下させるだけでなく、セメントの水和反応を促進することで初期凍害の防止に必要な圧縮強度 5.0N/mm² を早期に確保するものである³⁾。

実務では厳冬期には万全な凍結防止対策が施されるが、防水押えのコンクリート、部材厚さが薄いスラブ、パラペット等では予期せぬ寒波や養生管理の不備などにより、部材表面を凍結させてしまうという不具合が少なからず発生しているのが現状である。

著者らはこれまで non-AE コンクリートについて初期凍害を受けたコンクリートの強度増進性状に関する研究を行い、凍結開始材齢 6 時間では、凍結融解なしの強度

増進を下回り凍結の影響を受けること、凍結によるセメントマトリクスの被害程度および回復程度は W/C と凍結融解後の養生条件の影響を大きく受けている可能性があることを報告している⁴⁾。

そこで本研究では、初期凍害を受けたコンクリートの強度増進性状に関する検討を行うため、AE コンクリートについて初期材齢時（材齢 3 日まで）の凍結融解が強度増進に及ぼす影響を確認することとした。さらに、モルタルを用いた実験により、初期材齢時の凍結開始材齢に加え、W/C、凍結融解後の養生条件、凍結融解回数が強度増進に及ぼす影響を確認することとした。

2. コンクリートを使用した実験

2.1 実験計画

(1) 使用材料および調合

表-1 にコンクリートの使用材料、表-2 にコンクリートの調合を示す。コンクリートは、呼び方 27-18-20N の実機練りコンクリートを使用した。

表-1 使用材料

項目	記号	概要
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.16g/cm ³
水	W	上水道水
細骨材	S1	茨城県神栖市産陸砂, 表乾密度: 2.59g/cm ³ , F.M.: 2.30
	S2	栃木県佐野市産砕砂, 表乾密度: 2.63g/cm ³ , F.M.: 3.30
粗骨材	G	茨城県土浦市産砕石, 表乾密度: 2.68g/cm ³ , 実積率: 60.0%
混和剤	Ad	AE減水剤 (標準形 I 種)

表-2 コンクリートの調合

W/C (%)	SL (cm)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
				W	C	S1	S2	G	Ad
53.5	18	4.5	45.9	182	341	555	240	965	3.41

*1 株式会社鴻池組 技術研究所 建築技術研究第2グループ (正会員)

*2 室蘭工業大学大学院 工学研究科 環境創生工学系専攻 (学生会員)

*3 室蘭工業大学大学院 工学研究科 暮らし環境系領域 助教 (正会員)

*4 室蘭工業大学大学院 工学研究科 暮らし環境系領域 教授 (正会員)

(2) 凍結融解および養生条件

表-3 に凍結融解および養生条件を示す。記号 N は凍結なし，F は凍結ありを示す。F の後の数字は凍結開始材齢を示す。記号末尾の「封」，「水」は凍結融解後の養生方法が「封緘」，「水中」であることを示す。凍結開始材齢は 6h, 24h, 72h, 168h の 4 水準とした。本実験では，凍結開始時までは 20℃封緘養生とし，-20℃・12 時間の凍結と，5℃・12 時間の融解を 1 サイクルとして計 3 サイクルの凍結融解を与えた。ここで，F168 は，凍害を受けていない条件を想定し，材齢 7 日（圧縮強度 22N/mm²）に凍結融解を与えている。なお，凍結融解期間にあたる 3 日間は水和がほとんど進行しないと考えられるため，その後 20℃水中で材齢 94 日（積算温度 2730°D・D）まで回復養生を行うこととした。

2.2 実験方法

表-4 に測定項目および試験方法を示す。空隙量は φ50×100mm の供試体から採取した 5×5×5 mm の試料を用い，アルキメデス法により算出した。

圧縮強度試験の供試体は φ100×200mm，反発度試験の供試体は 150×150×150mm とした。

測定材齢は N において，材齢 1, 3, 7, 28, 91 日とし，凍結融解を与えた条件では，凍結融解前後，材齢 31, 94 日とした。F6 の封緘養生は材齢 94 日のみ測定を実施した。

2.3 実験結果および考察

凝結時間試験の結果を図-1 に示す。凝結の始発時間は 6 時間 2 分，終結時間は 8 時間 14 分となった。したがって，F6 の試験体は始発時に凍結を受けた条件となる。図-2 に積算温度と圧縮強度の関係を示す。材齢 94 日（2730°D・D）において F24, F72 では基準とする F168 と同等の強度まで回復しているが，F6 は基準とする F168 に比べて十分な強度回復はしておらず，non-AE コンクリートで行った実験結果と同様の結果となった⁴⁾。N 封は材齢 28 日（840°D・D）以降，圧縮強度が低い傾向を示している。これは，N 封は封緘養生であり水分が供給されないため，長期強度は低い傾向になったと考えられる。図-3 に積算温度と F168 に対する反発度比の関係を示す。反発度においても圧縮強度の結果と同様であり，既往の研究と同様の結果となった⁵⁾。図-4 に積算温度と全空隙率の関係を示す。初期凍害を与えたものも含め，全ての条件において積算温度の増加に伴い全空隙率が低下する傾向を示し，既往の研究のセメントペーストにおける結果と同様の傾向を示した⁶⁾。

図-5, 6 に材齢 31, 94 日の F168 を基準とした各物性値の比を示す。F24, F72 においては F168 に対する回復比が各物性値において 100%以上となった。一方，F6 は材齢 31 日においても F168 に対する圧縮強度比が 83%，

表-3 凍結融解および養生条件

記号	凍結前養生		凍結融解条件		回復養生	
	温度 (°C)	時間 (h)	温度 (°C)	時間 (h)	温度 (°C)	期間 (日)
N封	—		—		20	91
F6封	20 (封緘)	6	-20 ↓ 5	72	(封緘)	91
F6水		24			20 (水中)	91
F24水		72				90
F72水		168				88
F168水					20	84

表-4 測定項目および試験方法

対象	測定項目	試験方法
フレッシュコンクリート	スランプ	JIS A 1101
	空気量	JIS A 1128
	凝結時間	JIS A 1147
硬化モルタル (ウェットスクリーニング)	空隙量	アルキメデス法
硬化コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108
	反発度	JIS A 1155
	中性化深さ	JIS A 1153

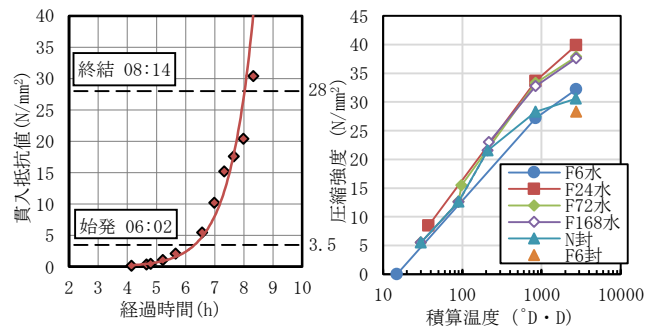


図-1 凝結時間試験

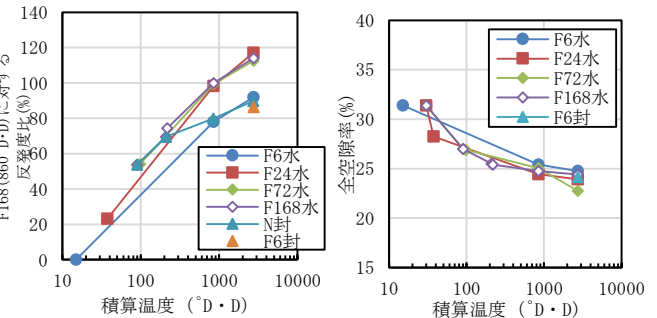


図-2 積算温度と圧縮強度の関係

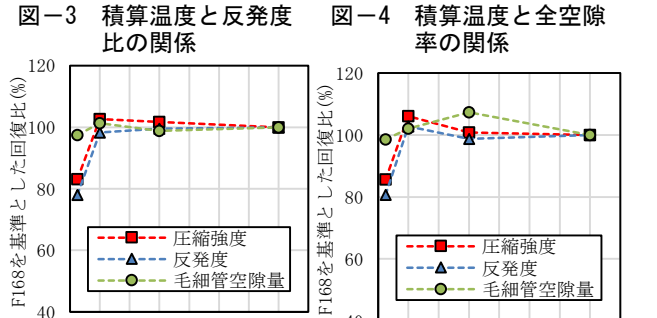


図-3 積算温度と反発度比の関係

図-4 積算温度と全空隙率の関係

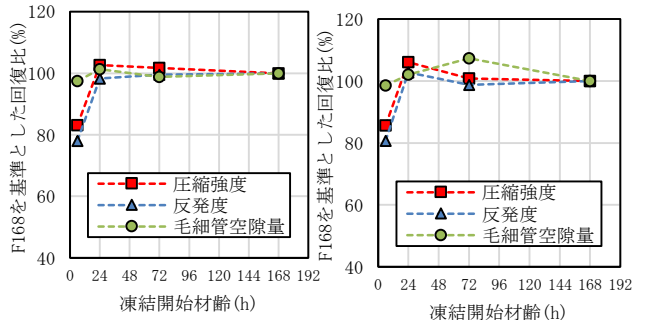


図-5 材齢 31 日 F168 を基準とした各物性値の比

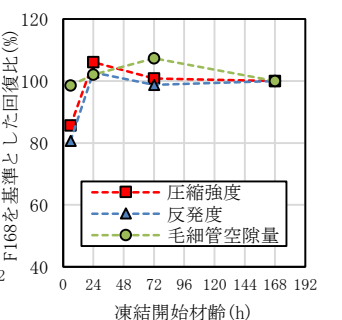


図-6 材齢 94 日 F168 を基準とした各物性値の比

材齢 94 日においても圧縮強度比が 86%であり、始発時に凍結を与えた条件である F6 は凍結融解後に水中養生を行っても基準とする F168 までは強度回復しない結果であった。

図-7 に凍結開始材齢と中性化速度係数の関係を示す。凍結開始時間が 6 時間 (F6) では中性化速度係数が大きい結果となった。F24 の圧縮強度は F168 同等の圧縮強度であるが、中性化速度係数がやや大きい結果となり、既往の研究と同様の傾向となった^{5),7)}。

3. モルタルを使用した実験

既往のセメントペースト実験⁴⁾において、W/C、凍結後の養生方法が異なる条件では強度増進性状が大きく異なったことから、凍結によるセメントマトリクスの被害程度および回復程度は W/C と凍結融解後の養生条件の影響を大きく受けている可能性を報告している。そこで、W/C、凍結開始材齢、凍結融解後の養生条件が強度増進に及ぼす影響を確認するためモルタルを用いた実験を行った。

3.1 実験計画

(1) 使用材料および割合

表-5 に使用材料を示す。表-6 に割合を示す。W/C は 45%, 55%, 65% の 3 水準とし、C : S = 1 : 3 の non-AE モルタルとした。供試体は $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ とした。

(2) 凍結融解および養生条件

表-7 に要因と水準を示す。W/C は 45, 55, 65% の 3 水準とした。凍結融解は $-20^\circ\text{C} \cdot 12$ 時間の凍結と、 $5^\circ\text{C} \cdot 12$ 時間の融解を 1, 3, 6 サイクルの 3 水準について実施した。凍結開始材齢は 3h, 6h, 8h, 12h, 18h, 24h, 凍結なし (N) について実施した。凍結開始までは 20°C 封緘で前養生を行った。凍結融解期間は水和がほとんど進行しないと考えられるため、各種試験は凍結融解期間分の材齢を延長し実施した。養生方法は封緘と水中について実施した。養生温度は 10°C , 20°C , 30°C の 3 水準とした。

3.2 実験方法

表-8 に測定項目および試験方法を示す。空気量はモルタル用エアメータを用いて測定した。アルキメデス法および水銀圧入法は供試体 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の供試体から採取した $5 \times 5 \times 5\text{mm}$ の試料を用いた。圧縮強度試験は $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の供試体にて実施した。なお、初期凍害による劣化の判定は、材齢 28 日における凍結作用を受けない供試体に対する凍結作用を受けた供試体の圧縮強度比が 90% 以下の場合とした^{8),9)}。測定材齢は N において、材齢 1, 3, 7, 28, 56 日とし、凍結融解を与えた条件は、凍結融解前後、材齢 31, 59 日とした

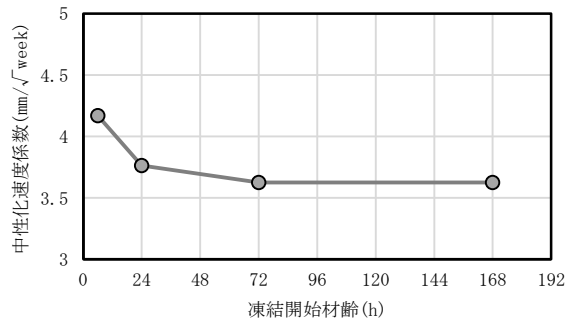


図-7 凍結開始材齢と中性化速度係数の関係

表-5 使用材料

項目	記号	種類
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.16g/cm^3
水	W	上水道水
細骨材	S	掛川産山砂, 表乾密度: 2.57g/cm^3 , 吸水率: 2.31% F.M.: 2.81

表-6 割合

W/C (%)	S/C	W (kg/m^3)	C (kg/m^3)	S (kg/m^3)	フロー (mm)	空気量 (%)
45	3	233	517	1551	150	2.0
55		270	492	1475	184	2.0
65		305	469	1406	219	2.0

表-7 要因と水準

W/C (%)	凍結開始材齢 (h) ^{*1}	回復養生方法	回復養生温度 ($^\circ\text{C}$) ^{*2}	凍結融解サイクル ^{*3}
45	3	封緘	10	$(-20^\circ\text{C} \cdot 12\text{h} \Leftrightarrow 5^\circ\text{C} \cdot 12\text{h}) \times 1$
	6			
	8			
	12			
55	12	水中	20	$(-20^\circ\text{C} \cdot 12\text{h} \Leftrightarrow 5^\circ\text{C} \cdot 12\text{h}) \times 3$
	24			
65	凍結なし (N)		30	$(-20^\circ\text{C} \cdot 12\text{h} \Leftrightarrow 5^\circ\text{C} \cdot 12\text{h}) \times 6$

*1: W/C=55%, 水中養生について凍結開始材齢 3, 12, 18h を実施
*2: W/C=55% について養生温度 10, 30 $^\circ\text{C}$ を実施
*3: W/C=55%, 水中養生について凍結融解回数 1, 6 サイクルを実施

表-8 測定項目および試験方法

対象	測定項目	試験方法
フレッシュモルタル	フロー	JIS R 5201
	空気量	JIS A 1128
	凝結時間	JIS A 1147
硬化モルタル	圧縮強度	JIS A 1108
	空隙量 ^{*1}	アルキメデス法
	細孔量 ^{*2}	水銀圧入法

*1: 凍結融解サイクル 1, 6cy, 10°C 封緘, 30°C 封緘養生以外にて測定
*2: 凍結開始材齢 6, 8, 24h, 20°C 水中養生における凍結融解 3cy 後および材齢 31d にて測定

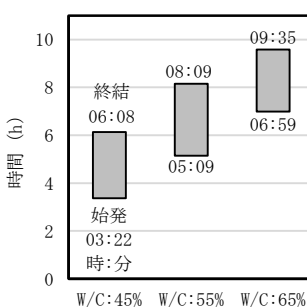


図-8 凝結時間試験

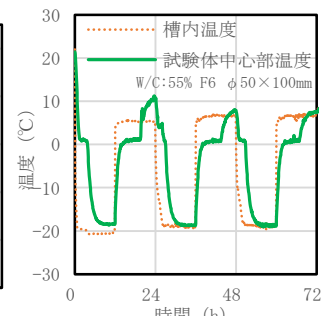


図-9 温度測定結果

3.3 実験結果および考察

(1) 温度測定結果および凝結試験結果

図-8 に凝結時間試験の結果を, 図-9 に凍結融解時の温度測定結果を示す。供試体 ($\phi 50 \times 100\text{mm}$) の中心温度は W/C55%, F6 における中心温度を示し, 凍結時の中心温度は約 -20°C まで低下していることを確認した。融解時において中心温度が 5°C 以上となっているが, これは, 始発直後に凍結を受けているものの, 融解時にわずかに水和反応を再開している可能性があると考えられる。

(2) 強度増進性状および全空隙率の変化

図-10 に W/C45% における強度増進性状および全空隙率の変化を示す。破線は N の 20°C 水中養生, 材齢 28 日に対する圧縮強度比 90% を示す。図の凡例は W/C - 凍結開始材齢 - 回復養生温度・方法を示す。材齢 59 日 ($1680^\circ\text{D} \cdot \text{D}$) では凍結開始材齢 6 時間においても, 基準とする凍結なしと同等まで強度回復した。凍結開始材齢 8h, 24h の水中養生では凍結なし以上の高い強度を示している。これは, 終結後に凍結融解を受けているものの, 凍結融解過程が低温養生として働き, 長期的に強度が増進する傾向になったと考えられる。図-11 に W/C55% における強度増進性状および全空隙率の変化を示す。材齢 31 日 ($840^\circ\text{D} \cdot \text{D}$) における封緘養生の結果は既往の研究と同様であった^{10), 11), 12)}。材齢 59 日 ($1680^\circ\text{D} \cdot \text{D}$) において, 終結前に凍結融解を受けた条件である凍結開始材齢 6h の圧縮強度は凍結なし以下となった。凍結開始材齢 8h および 24h の水中養生では凍結なし以上の強度を示している。図-12 に W/C65% における強度増進性状および全空隙率の変化を示す。材齢 59 日 ($1680^\circ\text{D} \cdot \text{D}$) において, 終結前に凍結融解を受けた条件である凍結開始材齢 6h および 8h の圧縮強度は凍結なし以下となった。全空隙率はすべての条件において, 圧縮強度の増進に伴い空隙率が低下する傾向を示した。

(3) 各種要因が圧縮強度および空隙率に及ぼす影響

図-13 に W/C55%, 20°C 水中養生における凍結開始材齢と圧縮強度の関係を示す。終結時に凍結融解を受けた条件となる凍結開始材齢 8h は材齢 31 日の時点では凍結なしに対する圧縮強度比で 90% 以下であるが, 材齢 59 日において凍結なし以上となった。すなわち, 凍結開始材齢が終結以降であれば, 水中養生を行うことで凍結なしと同等以上に強度回復する結果となった。また, 凍結開始材齢 6h から 8h の間で強度増進性状が変化していることから, 凝結終結前後の凍結が強度増進の停滞を引き起こしている可能性がある。図-14 に凍結開始材齢が全空隙率の変化に及ぼす影響を示す。図-13 において圧縮強度が低い凍結開始時間 3 および 6 時間は, 全空隙率が材齢 59 日 ($1680^\circ\text{D} \cdot \text{D}$) においても大きい結果となった。したがって, 凍結開始時間 3 および 6 時間は組織が緻密

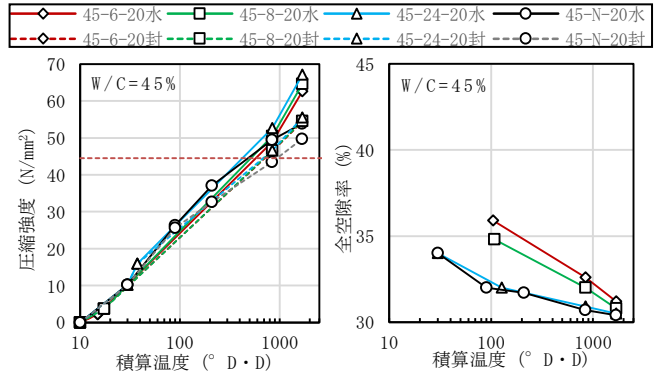


図-10 強度増進性状および全空隙率の変化 (W/C45%)

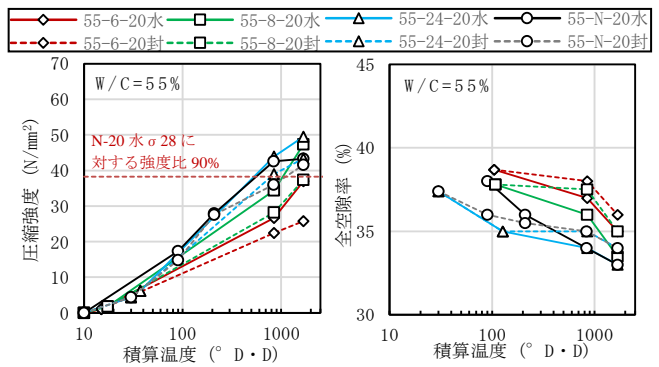


図-11 強度増進性状および全空隙率の変化 (W/C55%)

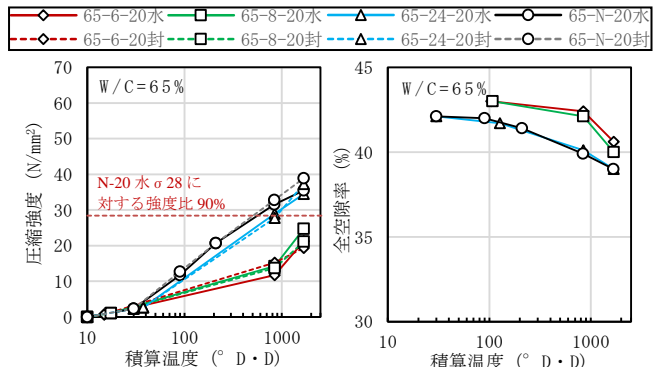


図-12 強度増進性状および全空隙率の変化 (W/C65%)

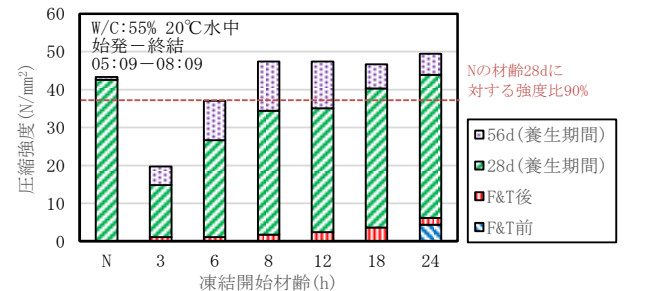


図-13 凍結開始材齢と圧縮強度の関係 (W/C55%)

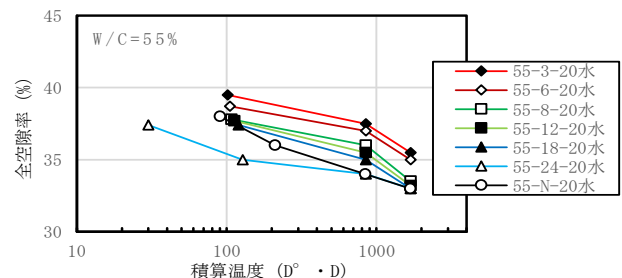


図-14 凍結開始材齢が全空隙率の変化に及ぼす影響

化しておらず、圧縮強度が低い結果になったと考えられる。

図-15 に水中養生における養生温度が圧縮強度に及ぼす影響を示す。回復養生温度を 30℃とすることで、F6 についても材齢 59 日 (1680°D・D) において凍結なし同等まで強度回復している。養生温度 10℃においても長期間水中養生を行うことで、強度回復する傾向を示しており、今後長期材齢の測定を実施する予定である。図-16 に封緘養生における養生温度と圧縮強度の関係を示す。封緘養生では水中養生と比較して強度が低く、回復養生は水分の供給が有効であるといえる。図-17 に水中養生における養生温度が全空隙率に及ぼす影響を示す。養生温度に関わらず、水中養生することで空隙率が低下する傾向を示した。

図-18 に凍結融解回数と圧縮強度の関係を示す。凍結融解回数は 1 回と 6 回では同様の強度増進性状を示し、凍結融解回数の影響は小さい結果となった。したがって、初期材齢時に一度でも凍結を受けると強度低下が生じるものと考えられる。

(4) 空隙構造の変化

図-19~21 に、W/C45, 55, 65%の凍結融解後と材齢 31 日における微分細孔量を示す。いずれの W/C および凍結開始材齢においても凍結融解後から材齢 31 日まで養生することで、細孔径分布のピークが細孔径の小さい側へ推移し、組織が緻密化することを確認した。既往の研究において W/C が高いほどペーストの細孔径分布は、初期の凍結融解の影響が大きく、初期材齢に凍結融解を

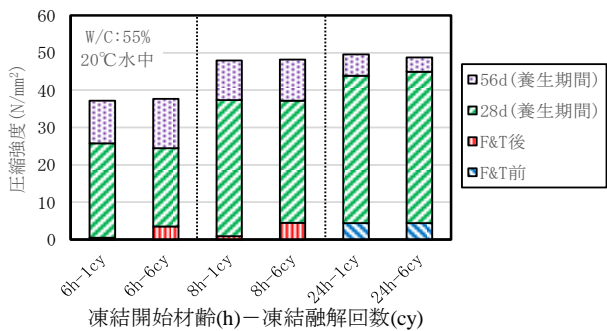


図-18 凍結融解回数と圧縮強度の関係 (W/C55%)

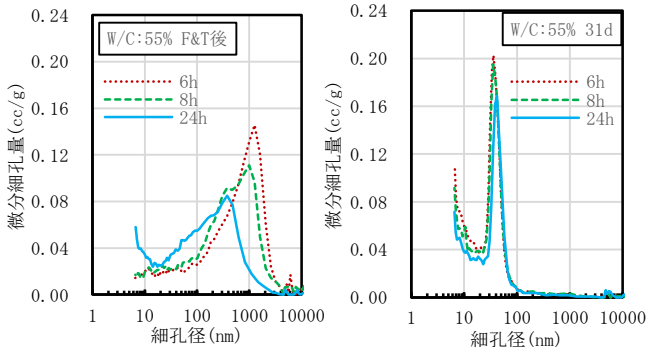


図-20 細孔径と微分細孔量 (W/C55% 20℃水中養生)

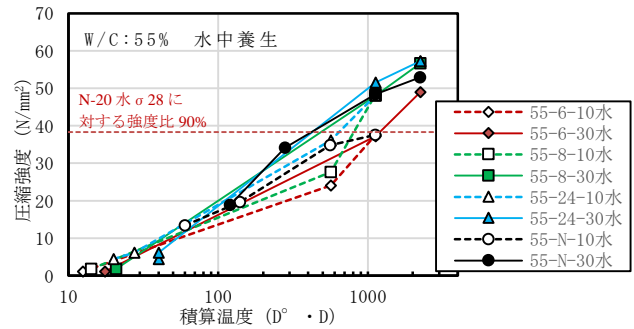


図-15 養生温度が圧縮強度に及ぼす影響 (水中養生)

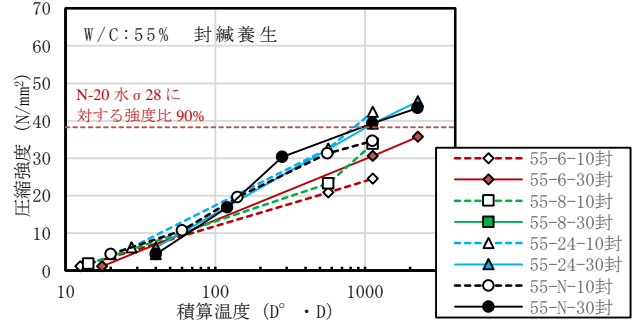


図-16 養生温度が圧縮強度に及ぼす影響 (封緘養生)

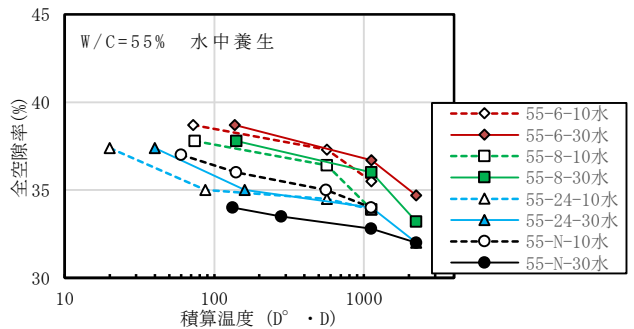


図-17 養生温度が全空隙率に及ぼす影響 (水中養生)

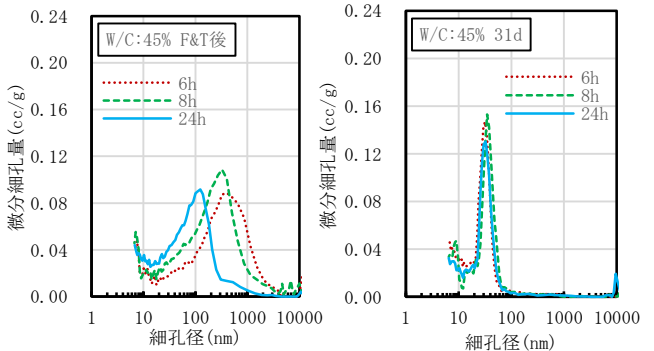


図-19 細孔径と微分細孔量 (W/C45% 20℃水中養生)

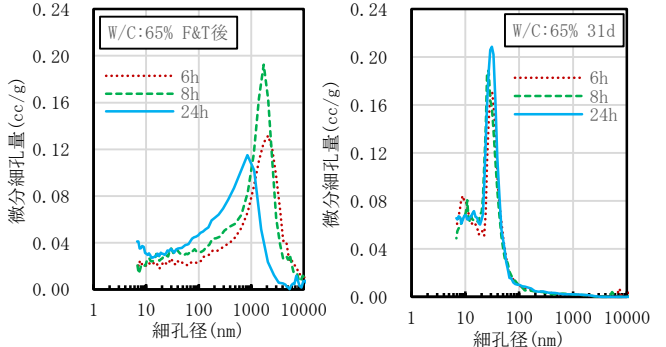


図-21 細孔径と微分細孔量 (W/C65% 20℃水中養生)

受けた場合、1 μ mを超えるサイズの細孔が増加すると報告されており、本実験においても同様の傾向となった¹³⁾。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) コンクリートの凝結始発前後に凍結を受けた場合には、強度増進が停滞することを確認した。
- (2) 凝結終結前後の凍結が強度増進の停滞を引き起こしている可能性がある。
- (3) 凍結融解後の強度増進に及ぼす養生条件の影響は大きく、封緘養生より水中養生の方が強度回復効果は高い。
- (4) 初期材齢時の凍結融解回数が強度増進性状に及ぼす影響は小さい。

謝辞

本研究の実施にあたり、JSPS KAKENHI JP16H0444の助成を受けた。記して、謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本建築学会：日本建築学会，寒中コンクリート施工指針・同解説，pp.19-25，2010
- 2) 金武漢，横山隆，田畑雅幸，洪悦郎，鎌田英治：コンクリートの初期凍害耐力に及ぼす空気量の効果に関する研究(第1報 普通コンクリートの場合)，日本建築学会論文報告集，Vol.265，pp.1-10，1978.3
- 3) 浜幸雄，鎌田英治：耐寒促進剤を用いたコンクリートの凍結環境下における強度増進性状と水分凍結，コンクリート工学論文集，Vol. 8，No.2，pp.73-80，1997.07
- 4) 古館菜由子，島影亮司，山下紘太郎，濱幸雄：コンクリートの初期材齢時の凍結による強度増進停滞機構に関する研究，コンクリート構造物の補修補強，アップグレード論文報告集，第18巻，pp.443-448，

2018.10

- 5) 島影亮司，国崎翠，崔亨吉，濱幸雄：初期材齢時の凍結がコンクリートの初期凍害レベルと耐久性に及ぼす影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.689-690，2016.8
- 6) 島影亮司，崔亨吉，濱幸雄：セメントの水和反応に及ぼす初期材齢時の凍結の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.525-526，2017.8
- 7) 国崎翠，濱幸雄，崔亨吉，本間有也：初期凍害がコンクリートの凍結融解抵抗性および中性化抵抗性に及ぼす影響，日本建築学会北海道支部研究報告集(88)，pp.9-12，2015.6
- 8) 浜幸雄，鎌田英治：無塩化・アルカリ型防凍性混和剤による初期凍害の防止効果，コンクリート工学論文集，Vol.7，No.1，pp.113-122，1996.1
- 9) 洪悦郎，鎌田英治，長島弘：寒中コンクリート，技術書院，p86，2000.06
- 10) 小池晶子，谷口円，西祐宜，光石尚道：初期凍害がコンクリートの耐久性に及ぼす影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.397-398，2014.09
- 11) 谷口円，小池晶子，西祐宜：初期凍害を受けたモルタルの内部損傷観察，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.223-224，2016.08
- 12) 前田哲宏，畑中重光，三島直生，犬飼利嗣：真空脱水処理を行ったコンクリートの初期凍害抑制効果について，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.383-388，2003.07
- 13) Y. Wei, Z. Wu and X. Gao: Pore Characteristics and Computed Permeability of Pastes Subject to Freeze-thaw Cycles at Very Early Ages by X-ray CT, Sixth International Conference on Durability of Concrete Structures, pp.566-571, 2018.05