

論文 凝結始発前後の凍結によるセメントペーストの強度増進停滞に関する研究

古館 菜由子^{*1}・山下 紘太郎^{*2}・金 志訓^{*3}・濱 幸雄^{*4}

要旨：本研究では、水セメント比（以下 W/C）と凍結融解後の養生方法の違いが強度増進停滞に及ぼす影響を確認するために、W/C=30%, 35%, 40%, 50%の4水準、養生方法は凍結融解後において20℃、60%RH環境下での封緘養生と20℃水中養生の2水準とし、凝結の始発前後に凍結させたセメントペーストを対象とした実験を行い、水和率や細孔径分布、全空隙率、圧縮強度、ひび割れ密度に着目した検討を行った。その結果、W/Cと養生方法の違いは水和率や細孔径分布、全空隙率には影響を与えるが、強度増進停滞には影響を与えていないことを確認した。また、強度増進停滞は凝結前後の凍結による影響を受ける可能性を示した。

キーワード：初期凍害、水セメント比、養生、圧縮強度比、細孔構造、水和率

1. はじめに

寒中コンクリート工事で最も留意すべきこととして、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とされており、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。また、低温環境下での強度増進は著しく緩慢となるため、所定の材齢で所要の圧縮強度が得られない場合があり、施工時に工程管理上の不具合が生じることとなる¹⁾。

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¹⁾。そのため、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いわれている。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を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⁾。初期凍害は、実務では温度測定、研究では凍結融解後の養生による強度回復の有無で判定するのが一般的である。しかし、強度回復レベルと被害の程度との対応が明かではないという問題がある。また実務では、厳冬期には万全な凍結対策が施されるが、向寒期

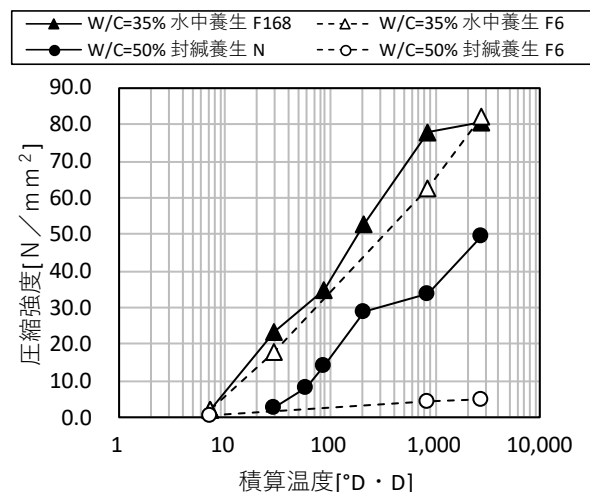


図-1 著者らによる既往研究⁴⁾結果
(セメントペースト実験)

や軽微な構造物、仕上げモルタルの施工時等に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も現実である。

著者らはこれまでコンクリートの初期材齢時の凍結による強度増進機構に関する研究を行い、凍結前後でセメントの水和反応性は変化しないこと、また、初期材齢時の凍結によって骨材界面は剥離を生じ、その後養生を行っても界面の剥離は回復しないことを報告している⁴⁾。さらに図-1の既往研究結果によると、凍結被害を受けていない条件(N, F168)と凍結開始材齢6時間(F6)のW/C(35%, 50%)と凍結融解後の養生方法(封緘, 水中

^{*1} 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)

^{*2} 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)

^{*3} 室蘭工業大学大学院 工学研究科 くらし環境系領域 助教 (正会員)

^{*4} 室蘭工業大学大学院 工学研究科 くらし環境系領域 教授 (正会員)

表-1 実験計画（セメントペースト実験）

記号	セメント (密度)	W/C [%]	凍結融解前養生		凍結融解条件		凍結融解後養生	
			温度[℃]	時間[h]	温度[℃]	時間[h]	温度[℃]	時間[日]
N	OPC (3.16 [g/cm³])	30	凍結なし				20 [封緘]	91
F		35						
		40						
		50						
		30	20 [封緘]	3	-20 ↓ 5	72		
35	4							
40	4.5							
50	7.5							

養生) が異なるセメントペースト供試体の圧縮強度の増進が大きく異なることから、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る可能性を報告している。

そこで、本研究では、W/C と凍結融解後の養生条件の違いがセメントペーストの強度増進停滞に与える影響の把握を行うために、W/C=30%, 35%, 40%, 50%の4水準、養生条件は凍結融解後において 20℃、60%RH 環境下での封緘養生と 20℃水中養生の2水準とし、凝結の始発前後に凍結させたセメントペーストを対象とした実験を行った。

2. 実験概要

2.1 実験計画

表-1に実験計画を示す。供試体は、普通ポルトランドセメント（以下 OPC）と上水道水を用いたセメントペーストで作製し、寸法はφ50×100 mmとした。W/C が強度増進停滞に与える影響を把握するために、W/C は 30%, 35%, 40%, 50%の4水準とし、凍結融解を与えない条件（以下 N）と凍結融解を与える条件（以下 F）で実験を行った。すべての W/C において、ブリーディング抑制のために練り返しを行い、その後に打設を行った。N において、打設後に 20℃、60%RH 環境下での封緘養生を行い、材齢 1 日で脱型を行った。脱型後、水分供給が強度増進停滞に与える影響を把握するために、20℃、60% RH 環境下での封緘養生と 20℃水中養生の2水準により 91 日間養生を行った。凍結融解の前養生は、20℃環境下での封緘養生とした。また、既往研究によると貫入抵抗の増加に伴い回復比が上昇する⁵⁾と報告されており、凝結始発時間に近い程に初期凍害を大きく受けていることが確認できた。そこで、本研究では F の条件で確実に初期凍害を与えるため、各 W/C の凝結試験を行った上で、凍結開始材齢を凝結始発時間前後に設定した。図-2 に示す凝結試験結果より、W/C=30%の始発時間は3時間、40%は4.5時間、50%は7.5時間となり、W/C=35%はこの結果を踏まえ4時間と設定した。凍結融解条件は、-20℃・12時間の凍結と5℃・12時間の融解を1サイクルとした合計3サイクルとしている。凍結融解後の養生は、水分供給が強度増進停滞に与える影響を把握するために、

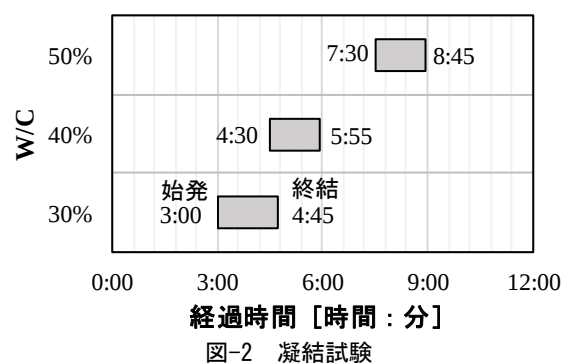


図-2 凝結試験

20℃、60%RH 環境下での封緘養生と 20℃水中養生の2水準を用いて、養生期間は91日間とした。

2.2 測定項目および方法

測定項目は、水和の変化を測定するために強熱減量により水和度と、TG-DTA により Ca(OH)₂ 含有量を測定し、細孔径や空隙の変化を測定するために水銀圧入法による細孔径分布の測定とアルキメデス法による全空隙率の測定を行った。また、凍結融解を受けることで供試体に生じるひび割れを観察するために、目視による観察とひび割れ密度を測定した。強度増進の把握においては圧縮強度の測定を行った。

測定方法において、アルキメデス法の吸水方法を本実験では、真空吸水法と煮沸吸水法の2つを用いて実験を行った。真空吸水法では5×5×5 mmに切断した試料を用いて、試料を真空状態にして水を吸水させるのに対して、煮沸吸水法では供試体1本（Φ50 mm×100 mm）を水で煮沸させることにより試験体に吸水させる方法である。この吸水方法の違いから、煮沸吸水法では、5 mmに切断した試料を扱う真空吸水法では測定できないような供試体に生じる微細なひび割れが測定できると考えている。なお、真空吸水法におけるアルキメデス法は改良法⁶⁾を用いて行った。また、強熱減量においては、アルキメデス法（真空吸水法）で用いた試料を使用し、試料を電気炉で1050℃に加熱し、結合水量を以下の式（1）より算出し、式（2）より水和度を求めた⁷⁾。

$$W = (M_{105} - M_{1050}) / M_{1050} \quad (1)$$

$$\alpha = W / 0.23 \quad (2)$$

ここで、 W ：結合水量、 M_{105} ：105℃乾燥後の質量 [g]、 M_{1050} ：1050℃乾燥後の質量 [g]、 α ：水和度である。

また、TG-DTA を用いた熱分析測定における加熱は、1 分間に 20℃上昇させ、1050℃に到達後 5 分間維持、その後冷却の条件で行った。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の脱水の温度範囲は 400～550℃とし、その減少量から質量における生成割合を算出した。凍結融解による供試体に生じるひび割れの観察において、ひび割れ部分に蛍光塗料が塗布してある供試体に紫外線ライトを当て、観察を行った。ひび割れ密度の測定はリニアトラバース法⁸⁾(ASTMC45771)を参考に行った。圧縮強度の測定は JISA 1108 に準じた。なお、初期凍害の判定は、材齢 28 日における凍結作用を受けない試験体に対する凍結作用を受けた試験体の圧縮強度比が 90%以下において初期凍害による劣化であるという判定基準としている³⁾。また、測定材齢は N において、材齢 1 日 (積算温度 30° D・D)、3 日 (90° D・D)、7 日 (210° D・D)、28 日 (840° D・D)、91 日 (2730° D・D) の 4 水準とし、F においては、凍結融解直後、材齢 31 日 (840° D・D)、94 日 (2730° D・D) の 3 水準とした。

3. 結果および考察

3.1 水和率の変化

図-3 に積算温度と水和率の関係を示す。凍結融解直後の積算温度が 30° D・D 付近において、F は W/C に関わらず水和率が低いが、840° D・D において、各 W/C における N の水和率と同等の値をとることを確認した。また、水中養生においても封緘養生と同様な傾向を示しており、封緘養生よりも 2～3%程値が高い結果となった。

図-4 に積算温度 840° D・D における W/C と $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率の関係を示す。W/C が高くなるにつれて、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率も高くなることを確認できる。また、養生方法や凍結の有無において $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率は変化がないことを確認した。

以上の結果より、凍結の有無や養生方法によって水和率は変化しないことから、初期材齢時の凍結はセメントの反応性に影響を与えていないことを確認できる。これは、既往研究⁴⁾においても同様な結果を示している。

3.2 細孔径分布の変化

図-5 に積算温度 840° D・D における累積細孔量と微分細孔量を示す。累計細孔量において、封緘養生では、W/C が低くなるにつれて累積細孔量も小さくなっている。また、W/C=30%、50%において N よりも F の方が累積細孔量は大きい値となるが、W/C=35%、40%においては N と F は同程度の値をとっている。水中養生では、W/C=50%のみ N よりも F の方が累計細孔量は大きい、他の W/C においては N と F は同程度の値であった。微分細孔量において、封緘養生では、W/C が高い程

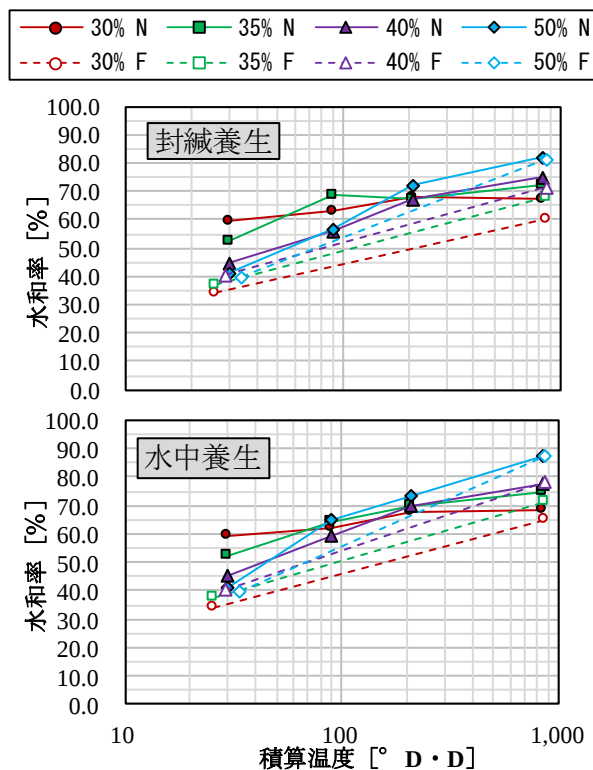


図-3 積算温度と水和率の関係

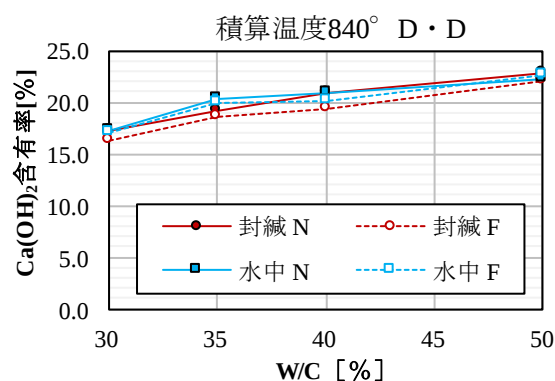


図-4 W/C と $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率の関係 (840° D・D)

に粗大径側に細孔量のピークがあることが確認できる。また、W/C=30%、50%においては N よりも F の細孔径のピークが粗大径側にピークがあり、W/C=35%、40%ではほぼ同程度にピークがあることを確認した。また、水中養生においても同様な傾向が得られている。

3.3 全空隙率の変化

図-6 に真空吸水による全空隙率の結果を示す。封緘養生において、積算温度 840° D・D で W/C が高くなると全空隙率も高くなることを確認できた。さらに、F と N の全空隙率はほぼ変わらないことを確認した。また、水中養生の結果においても封緘養生の全空隙率の結果と同様な傾向が得られている。

以上の全空隙率の結果は、W/C が低くなるにつれて累積細孔量も小さくなるという 3.2 の細孔径分布の結果と同様な傾向が確認できた。

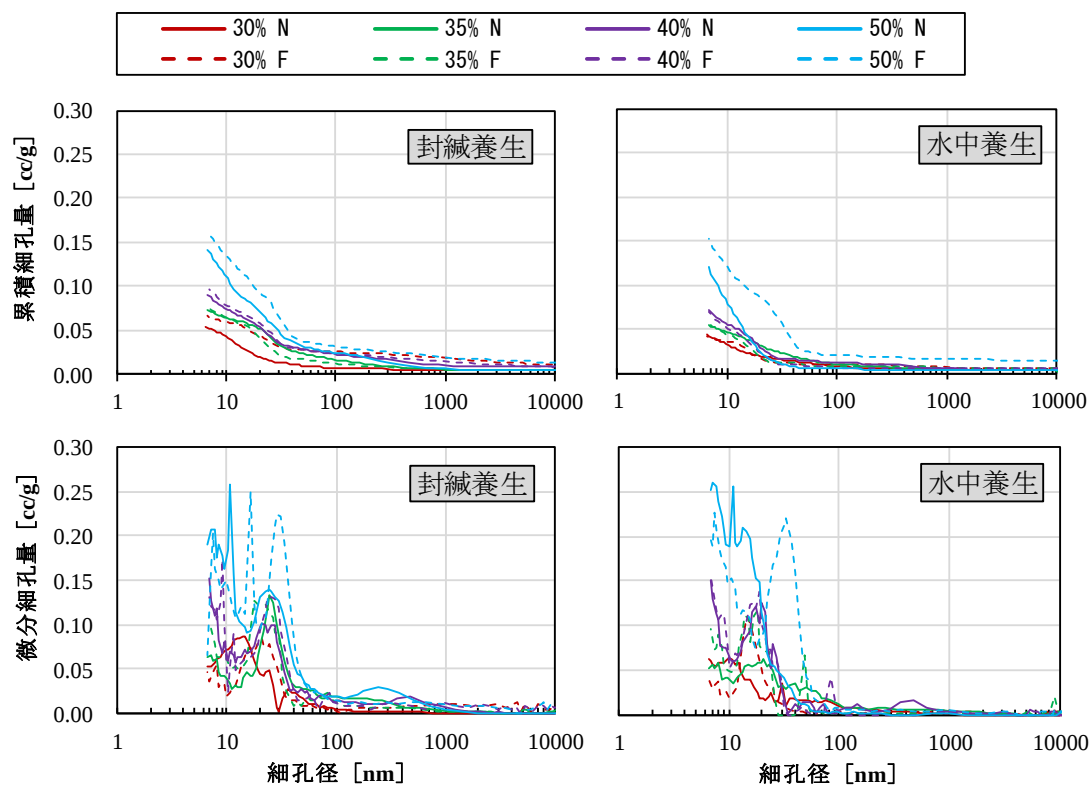


図-5 積算温度 840° D・Dにおける累計細孔量と微分細孔量

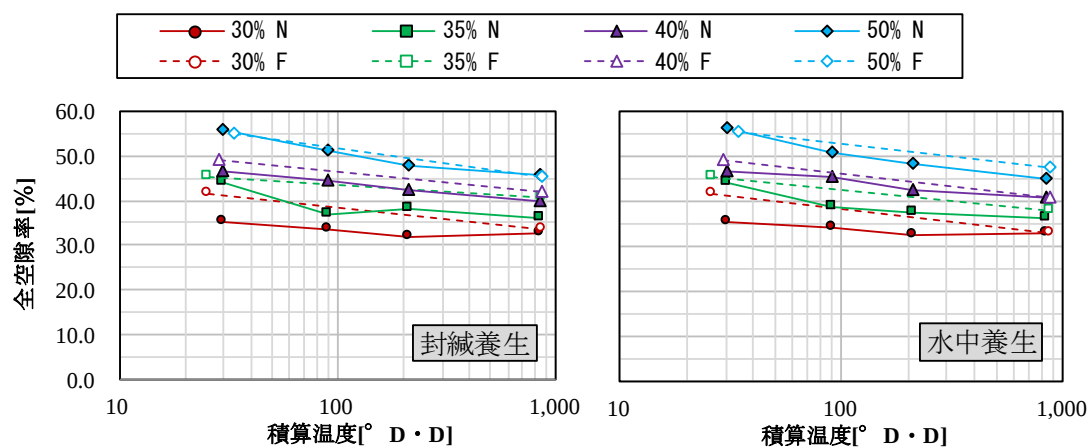


図-6 真空吸水による全空隙率

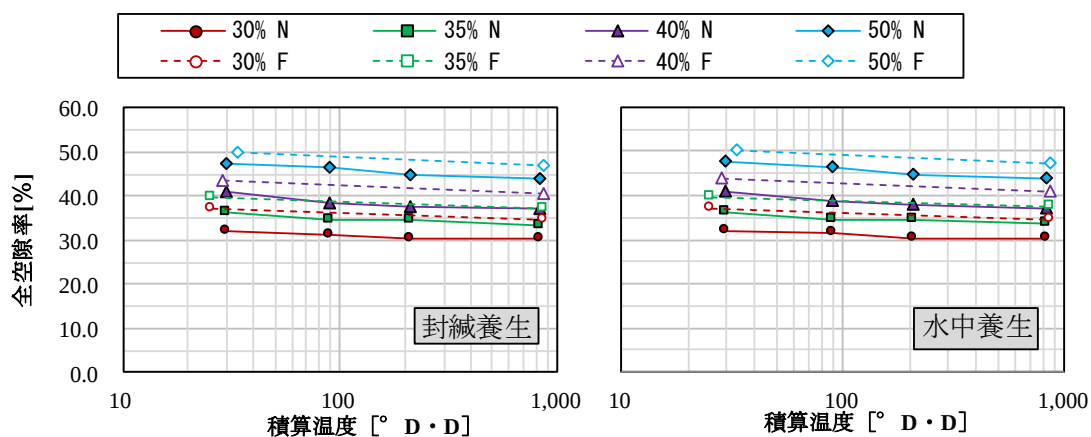


図-7 煮沸吸水による全空隙率

図-7に煮沸吸水による全空隙率の結果を示す。封緘養生において、積算温度 840° D・D で W/C が高くなると全空隙率も高くなっている。一方、全ての W/C において F と N の全空隙率に差が生じている。これは、煮沸吸水では供試体を切断せずに測定を行っているため、凍結を受けることで生じる微細なひび割れによる空隙により生じているものと考えられる。また、水中養生の結果においても、同様な結果が得られている。

3.4 強度回復

図-8に積算温度と圧縮強度の関係を示す。積算温度が 30° D・D において、N は W/C が低い程に圧縮強度は高い。また、F では圧縮強度が N と比べて W/C に関わらず同程度に低いことが確認できる。積算温度 840° D・D において、N はすべての W/C において大きく強度増進している。一方、F は N と比較した場合に強度増進停滞をしており、N との強度に大きな差が生じていることが確認できる。また、水中養生においても封緘養生の結果と同様な傾向である。

図-9に材齢 28 日の N を基準とした圧縮強度比を示す。なお、基準である N は各 W/C と養生方法に対応する N としている。この結果から、すべての W/C と養生方法において圧縮強度比が 90% に到達していないことが確認できる。このことから、全条件の F は初期凍害を受けていると判定することができる。

3.5 ひび割れ密度の変化

写真-1に供試体の断面観察を示す。すべての W/C の N と F を比較すると、F において供試体全体にひび割れが多いことが確認できる。また、図-10に積算温度 840° D・D におけるひび割れ密度を示す。W/C=30%, 50% ではひび割れ密度が高く、W/C=35%, 45% ではひび割れ密度が低い結果となっているが、図-9における W/C=30%, 50% の圧縮強度比が低く、W/C=35%, 45% では圧縮強度比は高いという結果と対応している。また、封緘養生と水中養生による養生方法の違いにおいては、大きな変化は生じていない。

3.6 考察

本研究では、W/C と凍結融解後の養生条件の違いが強度増進停滞に及ぼす影響を確認するために、凝結の始発前後に凍結させたセメントペーストを対象とした実験を行った。水和率や細孔径分布、全空隙率の検討により、凝結始発前後の凍結によるセメント自体の反応性に变化はなく、細孔径分布や全空隙率は W/C と養生方法の影響を受けている。一方、強度回復の検討において、W/C と養生方法の条件の違いによらず、強度回復はしていない。ここで、W/C=35% において強度回復を示す結果である既往研究（図-1）と本研究の条件を比較すると、凍結開始材齢の設定が異なり、既往研究では全 W/C の凍結開始

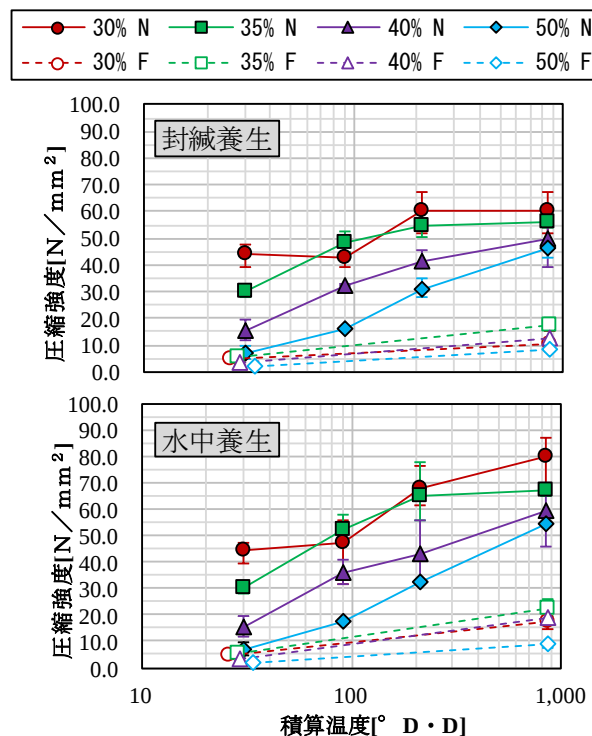


図-8 積算温度と圧縮強度の関係

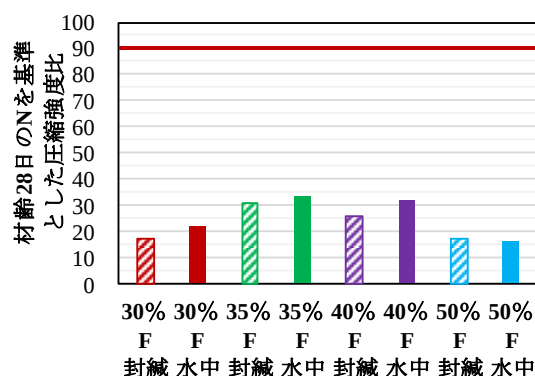


図-9 材齢 28 日の N を基準とした圧縮強度比

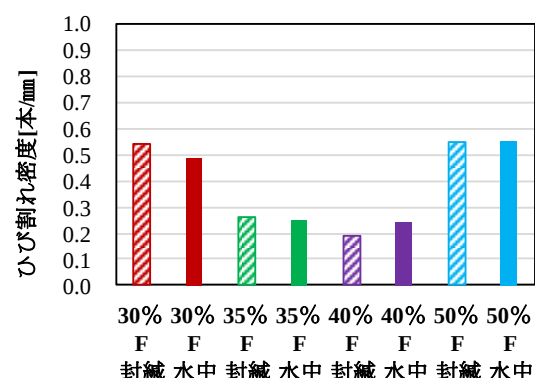


図-10 積算温度 840° D・D におけるひび割れ密度

材齢は練混ぜから 6 時間後である。練混ぜから 6 時間後とは、W/C=35% においては凝結終結後、W/C=50% においては凝結始発前に当たるため、強度増進停滞は凝結前後の凍結による影響を受ける可能性が考えられる。以上の検討より、W/C と養生方法の違いは、凝結始発前後に凍結を与えたセメントペーストの強度増進停滞に影響を

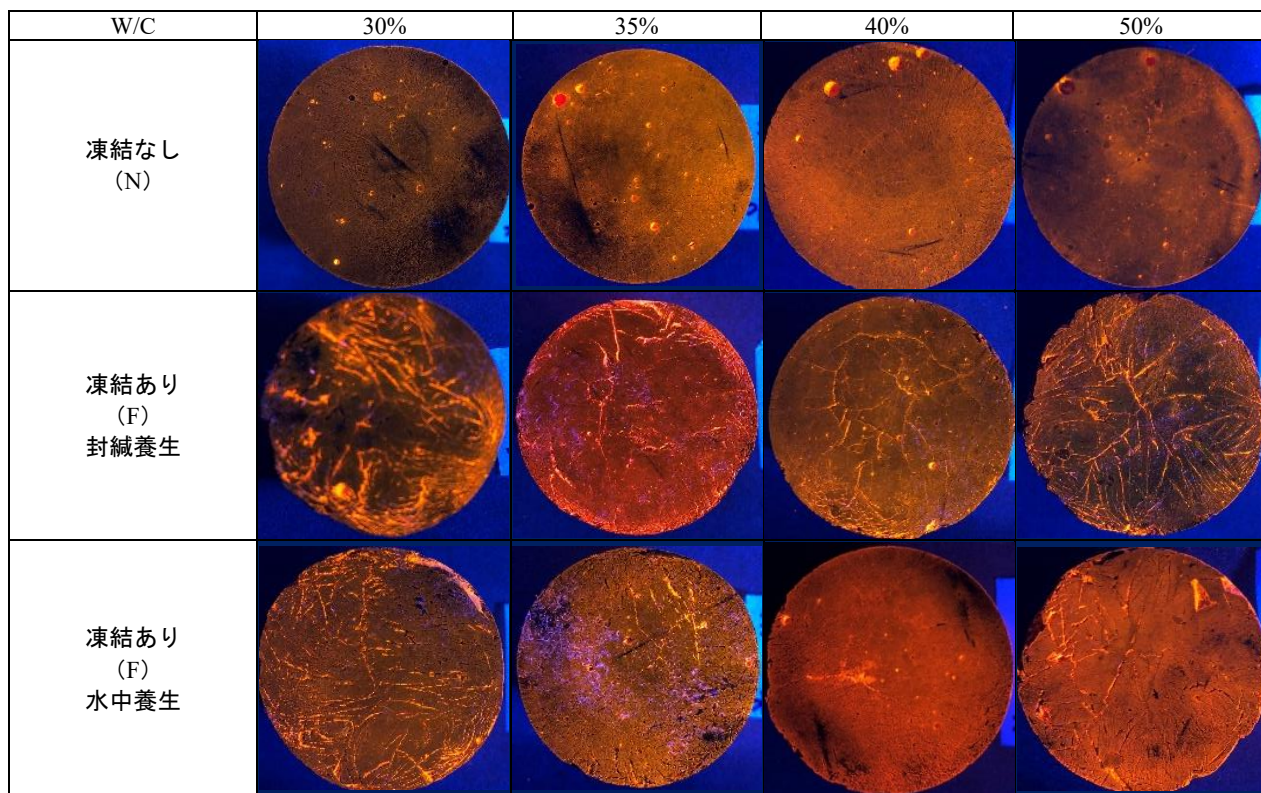


写真-1 供試体断面観察 (積算温度 840° D・D)

与えていない。

4. まとめ

本研究では、セメントペーストを対象とした実験において、W/C と凍結融解後の養生方法の違いが、凝結始発前後の凍結による強度増進停滞に及ぼす影響の検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 凝結始発前後の凍結によるセメント自体の反応性に変化はない。
- (2) W/C と養生方法の違いは、水和率や細孔径分布、全空隙率に影響する。
- (3) 凝結始発前後に凍結を与えたセメントペーストの圧縮強度は、全条件において強度が低く、強度回復しない。
- (4) W/C と養生方法の違いは、凝結始発前後に凍結を与えたセメントペーストの強度増進停滞に影響を与えていない。

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:寒中コンクリート指針・同解説, p.19, 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: 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
- 4) 古館茉由子, 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, Vol.18, pp.443-448, 2018.10
- 5) 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, 2016.8
- 6) 一般社団法人 セメント協会: セメント・コンクリート化学 解説付きデータ集, pp.366-369, 2016.6
- 7) 井上豪, 五十嵐心一, 川村満紀: 2, 3 の評価法により求めたセメントの水和度の比較, 土木学会第 59 回年次学術講演会, pp.1129-1130, 2004.9
- 8) 榎本靖彦, 大河内雄太, 斎藤憲寿, 加賀谷誠: 凍結融解作用をうけたコンクリートのひび割れ密度分布に関する基礎研究, 土木学会東北支部技術研究発表会, 2011