室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

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

メタデータ	言語: Japanese
	出版者: 日本材料学会
	公開日: 2020-12-17
	キーワード (Ja): 初期凍害, 強度回復, 水和, 付着強度
	キーワード (En):
	作成者: 古館, 茉由子, 島影, 亮司, 山下, 紘太朗, 濱, 幸雄
	メールアドレス:
	所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/00010344

論文

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

古館　茉由子[*1]，　島影　亮司[*2]，　山下　紘太朗[*3]，　濱　幸雄[*4]

Study on Strength Development Stagnation Mechanism by Freezing at Early Age of Concrete

Mayuko FURUDATE[*1], Ryoji SHIMAKAGE[*2], Kotaro YAMASHITA[*3] and Yukio HAMA[*4]

要旨：本研究では，初期材齢時の凍結がセメントの水和反応性に及ぼす影響を把握し，凍結による組織破壊および再養生による水和組織の変化の関係から，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検討を行った. その結果, 凍結前後でセメントの水和反応性は変化しないことを確認した. さらに, 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水セメント比の影響を大きく受けていること，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確認した.

キーワード：初期凍害，強度回復，水和，付着強度

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である．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，強度増進の停滞などを引き起こす被害のことであり，施工段階において工程管理上の不具合を生じさせる．

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，初期材齢時の凍結による組織破壊の程度と強度回復レベルの対応が明らかではないという問題がある．コンクリートの強度回復が見込めないといわれている初期凍害は，若材齢時の強度が不十分な段階で凍結を受けることで，氷の生成圧によって生じた微細ひび割れを含む組織の緩みや粗大化が起因していると考えられている．一方で，強度回復に関しては凍結後の水和反応による組織の緻密化が影響していると考えられる．しかし，初期材齢時の凍結が，その後のセメントの水和反応および水和組織の生成に及ぼす影響は明らかになっているとは言い難い．つまり，凍結前後でセメント自体の反応性には変化がない可能性があり，凍結による組織破壊の程度と水和による組織の緻密化のバランスが初期凍害の被害の大小を左右すると考えられる．またコンクリートの初期凍害の被害は，コンクリート強度を支配する重要な要因の一つであるセメントペーストと骨材の付着力が大きく影響している可能性が考えられる．

本研究では，初めにセメントペーストを用いて初期材齢時の凍結がセメントの水和反応性に及ぼす影響の把握と，凍結による組織破壊程度およびその後の水和による組織の緻密化の影響を明らかにした．また，骨材とセメントペーストの界面観察と付着試験を行い，初期材齢時の凍結がセメントペーストと骨材の付着性に及ぼす影響の把握と検討を行った．そして, セメントペーストとコンクリートを用いて, 初期材齢時の凍結による強度増進停滞機構に関する検討を行った.

2. セメントの水和反応に及ぼす初期材齢時の凍結の影響

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）を用いた W/C=35%のセメントペーストを作製した。ブリーディング抑制のため，練置き 3 時間後に練返しを行い，その後にφ5×10cm の円柱型枠に打設した。初期材齢時の凍結による被害程度を変化させるため，凍結開始材齢は 6，24，72 および 168h の 4 水準とし，-20℃・12 時間の凍結と 5℃・12 時間の融解を 1 回とした計 3 回

*1　室蘭工業大学大学院工学研究科環境創生工学系専攻　博士前期課程
*2　太平洋セメント株式会社中央研究所
*3　株式会社鴻池組技術研究所
*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

表-1　セメントペーストの実験計画

記号	使用セメント	W/C [%]	F&T 前養生 温度 [℃]	F&T 前養生 時間 [h]	F&T 条件 温度 [℃]	F&T 条件 時間 [h]	F&T 後養生 温度 [℃]	F&T 後養生 時間 [日]
F6	OPC	35	20 [封緘]	6	-20 ⇄ 5	72	20 [水中]	91
F24				24				90
F72				72				88
F168				168				84

表-2　コンクリートの調合

目標 Air [%]	目標 SL [cm]	W/C [%]	s/a [%]	単位質量 [kg/m³] W	C	S	G	絶対容積 [L/m³] C	S	G
1.0	18	50	43.3	210	420	720	965	133	280	367

の凍結融解を与えた．なお，F168 は凍結融解の影響を受けない段階として設定している．凍結融解前養生は 20℃封緘で行い，その後の凍結融解期間は水和がほとんど進行しないと考え，凍結融解後養生は注水時から材齢 94 日まで 20℃水中で行った．後養生を水中養生としている理由として，凍結の前後でセメント自体の反応性に変化がないかどうかを確認するために水和反応を十分に行う必要性があるためである．また，セメントペーストとの比較として W/C=50%の non-AE コンクリート供試体を作製した．コンクリートの調合は**表-2** に示す．練上がり後は，練置き後にφ10×20cm の円柱型枠に打設し，凍結融解や養生方法はセメントペーストの実験条件と同様な方法で行った．また測定材齢は凍結融解前，凍結融解後，材齢 31 日（積算温度 840°D・D）および材齢 94 日（2730°D・D）の 4 水準で行った．セメントペーストは圧縮強度，水和率，全空隙量とひび割れ密度の測定を行い，コンクリートは圧縮強度のみ測定を行った．なお，圧縮強度試験は JIS A 1108 に準じ，空隙量はアルキメデス法，水和率は強熱減量，ひび割れ密度[4] は ASTMC45771（リニアトラバース法）を参考とし算出した．

2.2. 実験結果および考察

図-1 にセメントペーストの積算温度と圧縮強度の関係を示す．840°D・D において F6，F24，F72 は F168 との間に 10N/mm² 程度の強度差があるが，長期湿潤養生後の 2730°D・D において全条件は同程度まで強度回復することを確認した．

図-2 にセメントペーストの積算温度と水和率の関係を示す．840°D・D 以降において全条件は同程度となった．

以上の結果より，初期材齢時に凍結を受けた場合においても，凍結開始材齢によらず，セメントの反応性に変化はないことを確認した．

図-3 にセメントペーストの積算温度と全空隙率の関係を示す．F6 のみ凍結融解後の全空隙率が増加

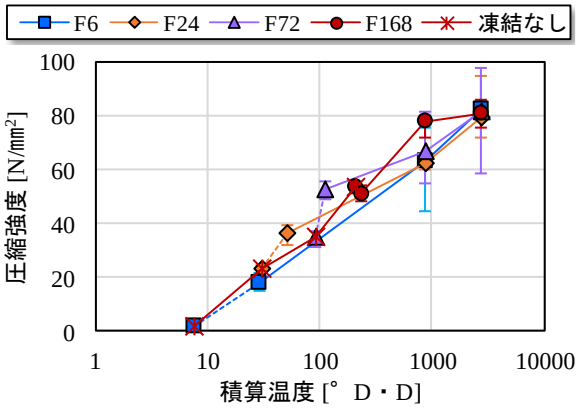


図-1　セメントペーストの積算温度と圧縮強度の関係

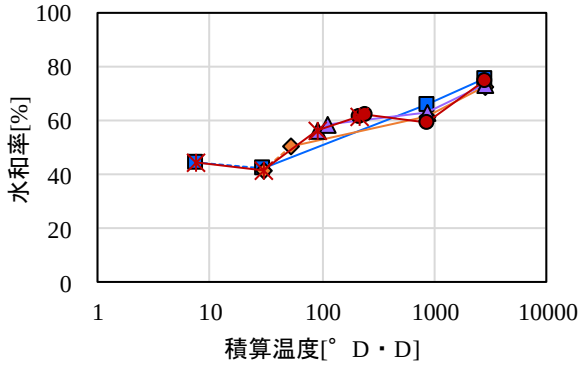


図-2　セメントペーストの積算温度と水和率の関係

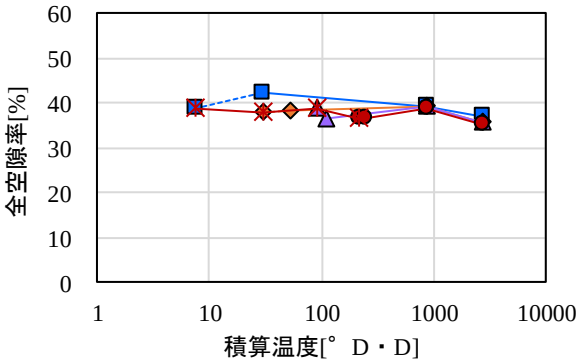


図-3　セメントペーストの積算温度と全空隙率の関係

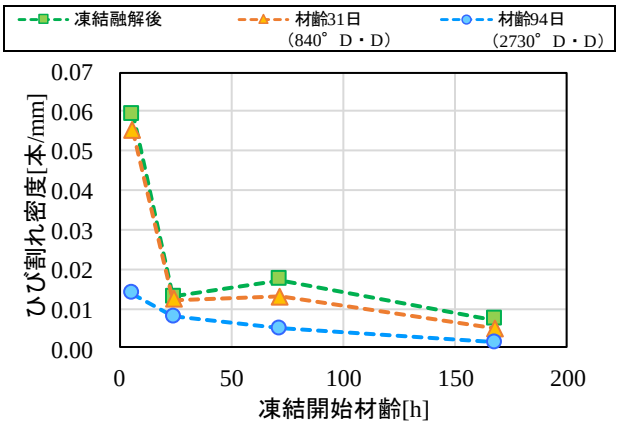


図-4　セメントペーストの材齢経過による ひび割れ密度変化

しているが，840°D・D以降においては全条件で空隙率は同程度となった．

図-4 にセメントペーストの凍結融解後から2730°D・Dまでのひび割れ密度の変化を示す．ここから F6 が凍結融解後と 840°D・Dにおいて著しく高いことが確認できる．この理由として，材齢 6h で未結合水量が多いために凍結被害が大きく，ひび割れ密度が高いと考える．また，全条件で材齢経過に伴いひび割れ密度の減少を確認した．セメントの反応性に問題が無いことを考慮すると，長期湿潤養生により，自己修復と同様な効果でひび割れが埋まる可能性が考えられる．

図-5 にセメントペーストの各積算温度における F168 を基準とした物性値の回復比と凍結開始材齢の関係を示す．840°D・Dにおいて，圧縮強度の回復比は F168 以外の条件では 90%以下であるため，初期凍害を受けていると判断できる．また，凍結開始材齢が早いほど強度回復比は小さくなるが，水和度と全空隙量の変化はあまり変化が見られない．このことから圧縮強度に差が見られる原因として，ひび割れ，養生後の毛細管空隙の粗大化や構造の変化の可能性が考えられる．また 2730°D・Dにおいては，各物性値の比はほぼ 100%を示していることから，初期凍害の影響は見られないことが確認できる．

図-6 にコンクリートの積算温度と圧縮強度の関係を示す．840°D・D および 2730°D・D において，F6 のみが F168 と約 7.0N/mm^2 の強度差を生じている．

以上の結果より，初期材齢の凍結をセメントペーストに与えた場合は 2730°D・D において強度回復を示したが，コンクリート実験では強度回復を示さないことから，骨材とセメントペーストの界面の付着性が強度増進停滞に影響を及ぼす要因である可能性が示唆される．

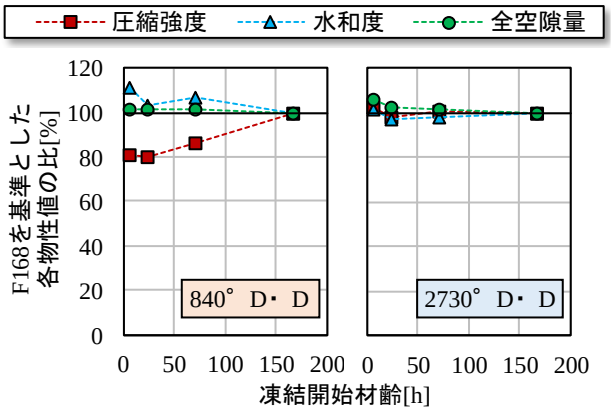


図-5　各積算温度における各物性値の比

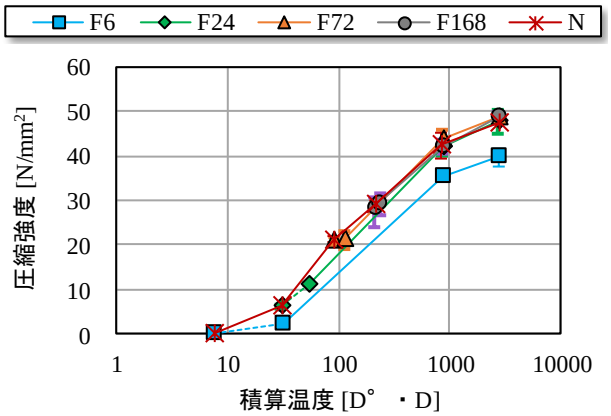


図-6　コンクリートの積算温度と圧縮強度の関係

表-3　実験計画

記号	使用セメント	W/C [%]	F&T 前養生 温度 [℃]	F&T 前養生 時間 [h]	F&T 条件 温度 [℃]	F&T 条件 時間 [h]	F&T 後養生 温度 [℃]	F&T 後養生 時間 [h]
N	OPC	50	凍結なし				20 [封緘]	91
F6			20 [封緘]	6	-20 ⇕ 5	72		91
F24				24				90
F48※1				48				89
F72				72				88

※1　付着強度試験は除く

3. 初期材齢時の凍結が骨材-セメントペースト界面の付着性に及ぼす影響

3. 1. 実験計画

(1)　骨材-ペースト界面の観察

型枠はプラスチック製容器の底面に，切断した粗骨材の切断面を接着させたものを使用した．その型枠に OPC を用いた W/C=50%のセメントペーストを練上がり後に，ブリーディング抑制のため練置き 5 時間後に練返しを行った後に打設した．**表-3** に実験計画を示す．凍結開始材齢は 6h，24h，48h および 72h の 4 水準とし，凍結融解後は封緘養生を行った．後養生を封緘養生で行った理由として、実施工環境に合わせ，水分の供給がない場合を想定しているためである．また界面の観察はマイクロスコープを用いて骨材-セメントペースト間の距離の測定を行った．測定材齢は，N の場合は材齢 1，3，7，28，91 日の 5 水準，F の場合は凍結融解後，材齢 31，94 日の 3 水準である．また材齢 94 日に，試験体を高さ方向に切断し，その切断面に蛍光塗料を塗布後，紫外線ライトを用いて目視による断面の観察を行った．なお骨材は，本実験のコンクリート供試体に用いている骨材と同様の安山岩を使用した．

(2)　石材-ペースト界面の付着強度試験

付着強度試験用の試験体の型枠は，4×4×16cm の角柱型鋼製型枠の中に 4×4×8cm に加工した表乾状態の石材（花崗岩）と凍結圧緩和用に 5mm 厚のスチレンボードを設置したものを使用した．その型枠に OPC を用いた W/C=50%のセメントペーストを練上がり後に，ブリーディング抑制のため練置き 5 時

間後に練返しを行った後に打設した．実験計画を**表-3** に示す．凍結開始材齢は 6，24 および 72h の 3 水準とし，凍結融解前養生は 20℃封緘で行い，その後の凍結融解期間は水和がほとんど進行しないと考え，凍結融解後養生も材齢 94 日まで 20℃封緘とした．**図-7** に付着強度試験方法を示す．付着強度試験方法は，Alexander[5] の推奨する中央一点載荷による曲げ試験を採用した．また，測定材齢は N の場合は材齢 6h，1，3，28，91 日の 5 水準，F の場合は材齢 31，94 日の 2 水準とした．

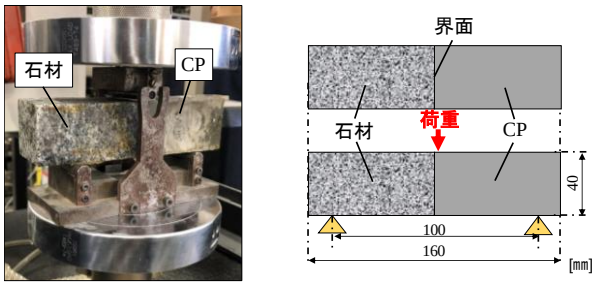
(3)　初期材齢時の凍結によるセメントペーストおよびコンクリートの強度増進停滞の影響

供試体は OPC を用いた W/C=50%のセメントペーストとコンクリートを用いた．コンクリートは**表-1** と同調合である．また各型枠や打設までの流れは 2.1 の実験計画と同様である．**表-3** に実験計画を示す．凍結開始材齢は 6，24，48 および 72h の 4 水準とし，凍結融解条件は付着強度試験と同条件である．また測定材齢は，N の場合は材齢 6h，1，3，28 および 91 日の 5 水準，F の場合は凍結融解前，凍結融解後，材齢 31 および 94 日の 4 水準である．セメントペーストは圧縮強度，水和率の測定を行い，コンクリートは圧縮強度試験を行った．なお，圧縮強度試験は JIS A 1108 に準じ，水和率は強熱減量で測定を行った。

3.2. 実験結果および考察

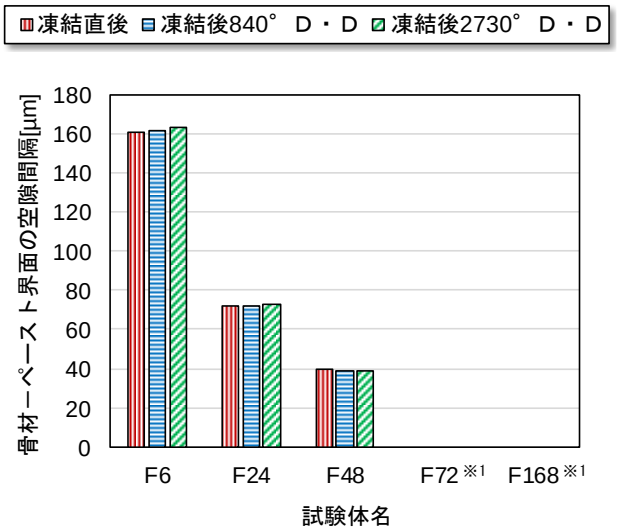
(1)　骨材-ペースト界面の観察

図-8 に凍結開始材齢の異なる試験体の骨材-ペースト界面の空隙間隔の変化を示す．凍結開始材齢が遅くなるにつれて空隙間隔は小さくなり，F 72 以降では空隙間隔が生じなかった．この理由として，材齢 3 日以降で著しく成長が始まる遷移帯の形成[6]に伴う付着水の減少が関係していると考える。骨材表面の付着水は材齢が経過するに伴い減少し，遷移帯は材齢 3 日以降に著しく成長が始まる．このことから，遷移帯形成以前に凍結を受ける場合には界面とペースト界面の付着水量に伴う水の膨張により距離が押し広げられるため、凍結開始材齢が早いほど空隙間隔は大きくなると考える．そして遷移帯が形成されると骨材表面の付着水は徐々に消費されるため，骨材とペースト界面の空隙間隔が小さくなると考えられる．また凍結直後，凍結後 840°D・D，凍結後 2730°D・D を比較すると，養生期間の差は確認できなかった．



曲げ試験載荷前の様子　　試験体の寸法

図-7　付着強度試験方法



※1　骨材-ペーストの空隙間隔の値は 0［μm］

図-8　凍結開始材齢の異なる試験体の骨材-ペースト界面の空隙間隔の変化

図-9 に凍結開始材齢ごとの断面観察結果を示す．骨材界面に着目すると，F6 は骨材界面の剝離が目視においても確認できるが，F24 から F72 までの条件では，塗料の発光による目視での界面部分の劣化は確認できない．次にセメントマトリクスに注目すると，F6 は劣化程度が他の条件と比較して大きいことを確認した．一方 F24 から F72 には，N には見られない層状の凍結の痕跡が確認でき，この現象は Taber-Collins の凍害機構理論[7]と類似していると考えられる。

(2) 石材-ペースト界面の付着強度試験

図-10 に石材－ペースト界面の曲げ強さと材齢の関係を示す．凍結を与えていない N は，材齢 3 日で

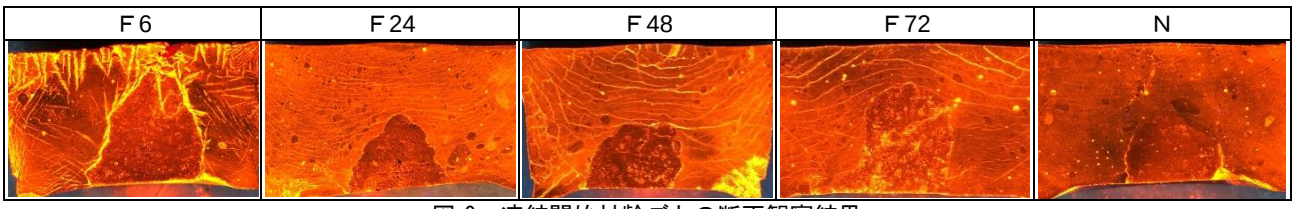


図-9　凍結開始材齢ごとの断面観察結果

曲げ強さが最大となり，その後に材齢が経過するほど強度が低下する結果となった．初期材齢時に凍結を与えた条件は，凍結後に曲げ強さは発揮されず，その後に養生を行っても回復しなかった．同様な結果として，堀内によるコンクリートと石材の付着に関する研究[8]がある．その中に，養生中に乾燥を受けると付着強度が著しく低下すること，また初期に凍結を与えた場合，付着力が 0 となることを報告している．前者の理由として，石材とコンクリートの収縮量が著しく異なっていることを挙げている．本実験でも同様に 2 つの材料を使用し，かつ封緘に近い状態で養生を行っている．そのため，徐々にひび割れが発生・進展することにより，N の付着力が低下した可能性が考えられる．後者の理由として，付着面は自由水が集り易く，この水膜が一番先に凍結し，更に凍結温が続けばその部分へ自由水を吸引するので凍結層はますます広がるため両者は遊離して付着しないことを挙げており，本実験でも同様な現象が生じたと考える．

(3)初期材齢時の凍結によるセメントペーストおよびコンクリートの強度増進停滞の影響

図-11 にセメントペーストの積算温度と水和率の関係を示す．水和率は全凍結条件において 840° D・D 以降で同程度となり，この傾向は**図-2** と同様な傾向であった．この結果から今回の実験においても，W/C や凍結融解後の養生によらず，初期材齢時の凍結はセメントのポテンシャルとしての反応性に影響を与えないことが確認できる．

図-12 にセメントペーストおよびコンクリートの圧縮強度と積算温度の関係を示す．セメントペーストでは，凍結融解後において F6 および F24 の強度が N の強度増進を下回っており，これは凍結の影響がみられる．一方 F48 および F72 の条件は，N の強度増進と一致しており，凍結の影響はみられない．840° D・D においては，F6 の強度回復程度が極めて小さく，また 2730° D・D においても圧縮強度が 5.0N/mm^2 程度であった。一方，F6 以外の条件は 840° D・D 以降の強度が低下しているが，その理由については現状では明らかではない．コンクリートの F6 では，凍結融解後において，セメントペーストの F6 の場合と同様に N よりも強度が低いため，初期材齢時の凍結の影響がみられる．一方，F6 以外の条件は 840°D・D 以降においても N と同程度の強度となり，初期材齢時の凍結の影響はみられない．これらの結果から，セメントペースト，コンクリートの F6 に着目してみると，骨材を含んだコンクリートがセメントペーストよりも凍結の影響が小さく，強度の回復程度も大きいといえる．このことから初期材齢時の凍結による被害は，骨材-セメントペースト界面の付着の低下の影響だけでなくセメントマトリクスに生じるひび割れ等の影響も考慮する必要性があると考えられる．

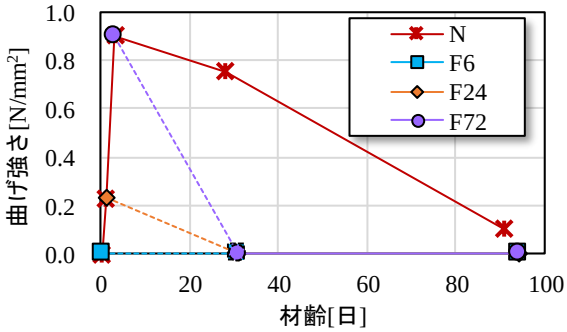


図-10　石材-ペースト界面の曲げ強さと材齢の関係

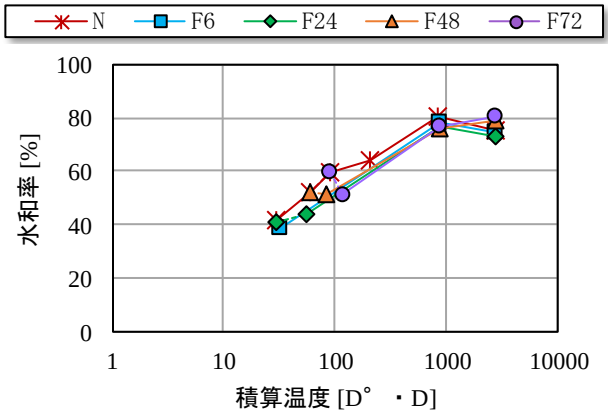


図-11　セメントペーストの積算温度と水和率の関係

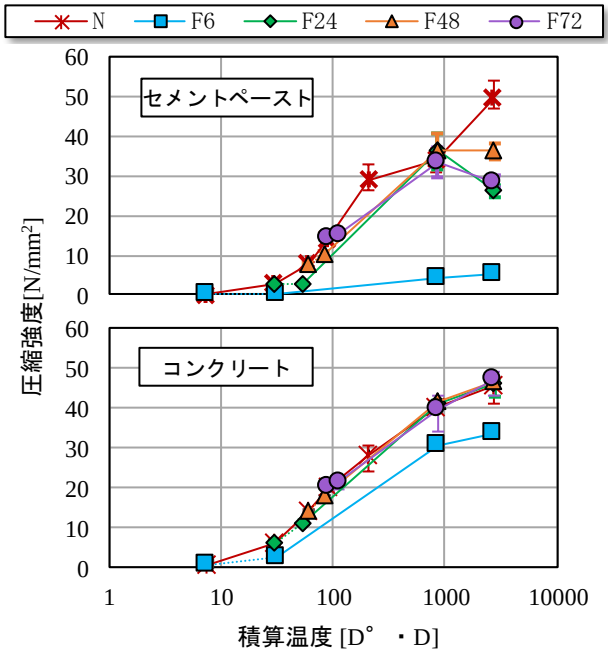


図-12　セメントペーストおよびコンクリートの積算温度と圧縮強度の関係

図-13 に本研究で行った W/C および凍結融解後養生が異なるセメントペーストの強度回復を示す．同

図には，本実験の 2.2 の結果である W/C=35%・凍結後水中養生，W/C=50%・凍結後封緘養生の条件における F6 と凍結を受けていない条件（N）を示している．なお，水セメント比 35%・凍結後水中養生の条件では凍結の影響がないと考えられる F168 を N としている．各条件の F6 を比較すると，凍結後の養生は異なるが，W/C が大きいほど F168 および N に対する強度回復程度が小さいことが確認できる．

以上の結果より，コンクリートの初期材齢時の凍結による強度増進停滞の程度は，セメントマトリクスと骨材-ペースト界面の被害程度の両方の影響を受けると考えられる．また本研究の範囲では，凍結後の強度回復レベルはW/Cに大きく依存していると考えられる．初期材齢時の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に与える，セメントマトリクスのひび割れや水セメント比，骨材界面の付着，凍結融解後の養生条件の影響の程度については本研究の範囲では明らかにできないため，今後の課題とする．

5. まとめ

(1) 初期材齢時の凍結は，凍結開始材齢に関わらず，セメントの反応性に影響を与えない．

(2) 初期材齢時の凍結による骨材とペースト界面の被害程度は，凍結開始材齢が早いほど被害程度が大きく，その後養生を行っても回復しない．

(3) 初期材齢時の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水セメント比に依存するため，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は，セメントマトリクスと骨材-ペースト界面の被害程度が複合的に影響することを考慮する必要がある．

謝辞

本研究は，JSPS 科研費 JP16H04444 の助成を受けたものである．記して，謝意を示す．

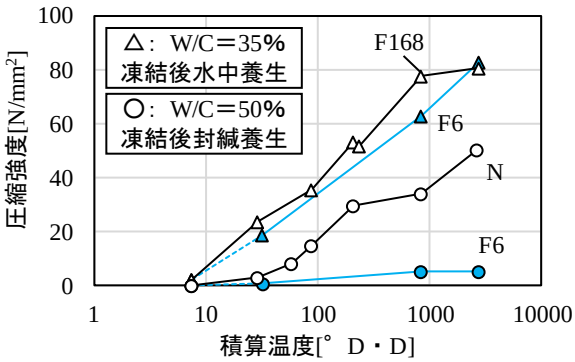


図-13　W/C および凍結融解後養生が異なるセメントペーストの積算温度と圧縮強度の関係

参考文献

1) 日本建築学会：寒中コンクリート施工指針・同解説，2010
2) 金武漢ら：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) 浜幸雄ら：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
4) 榎本靖彦ら：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
5) K.M. Alexander, et al.：Aggregate-cement bond, cement paste strength and the strength of concrete, The structure of concrete，Proc. of International Concrete，1965
6) 内川浩ら：硬化モルタル及びコンクリート中の遷移帯厚さの評価並びに遷移帯厚さと強度との関係の検討，コンクリート工学論文集，Vol.4，No.2，pp.1-8，1993.7
7) A.R.Collins：The Destruction of Concrete by Frost Institution of Civil Engineers（London），pp.29-41，1944
8) 堀内照夫：石材とコンクリートの付着強度について（モルタルによる実験），新砂防，Vol.16，No.4，pp.22-27，1963-1964