

論文 凝結終結時に凍結した各種コンクリートの強度増進性状

山下 紘太郎*1・濱 幸雄*2

要旨：著者らはこれまでセメントペーストおよびモルタルの初期材齢時の凍結による強度増進停滞に関する研究を行い、凍結前後でセメントペーストの水和反応性は変化しないこと、モルタルでは被害程度の差は凍結を受けた際の凝結性状の影響が大きく、凝結終結前後の凍結が被害の有無を左右する結果になったことを報告している。しかし、凝結終結前後の凍結がコンクリートの強度増進に及ぼす影響は不明である。そこで本研究では、各種コンクリートについて凝結終結時の凍結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、混和剤による連行空気がないものは、凝結終結時の凍結により強度増進が停滞する結果であった。

キーワード：初期凍害、凝結時間、養生方法、圧縮強度、空気量、混和剤

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都合が生じることとなる¹⁾。

一般的に初期凍害の防止策として、圧縮強度 5.0N/mm^2 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⁾。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、 10°C の環境で材齢 1 日以降に凍結を受けた条件では効果を確認されている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/mm^2 を早期に確保するものである³⁾。

初期凍害の判定は、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程度との対応が明ら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。

著者らはこれまでセメントペーストおよびモルタルの初期材齢時の凍結による強度増進停滞に関する研究を行い、凍結前後でセメントペーストの水和反応性は変化しないこと⁴⁾、モルタルを用いた実験では、被害程度の差は凍結を受けた際の凝結性状の影響が大きく、凝結終結前後の凍結が被害の有無を左右する結果になったことを報告している⁵⁾。しかし、凝結終結前後の凍結が粗骨材を有するコンクリートの強度増進に及ぼす影響は不明であり、混和剤による影響についても検討する必要がある。

そこで本研究では、各種混和剤を使用したコンクリートについて、凝結終結時の凍結が強度増進に及ぼす影響を確認することを目的とした。ただし、本研究は初期凍害の防止に必要な圧縮強度 5.0N/mm^2 を確保せずとも被害を受けない条件を確認するものではなく、供試体での基本的な性状確認を目的としている。

2. 実験計画

2.1 使用材料および調合

表-1 にコンクリートの使用材料を示す。セメントは、JIS A 6204 (コンクリート用化学混和剤) の 6.2.1 試験に用いる材料に規定する三つの異なる生産者の普通ポルトランドセメントを等量ずつ使用した。水は、上水道水とした。骨材は、JIS A 6204 (コンクリート用化学混和剤) の 6.2.1 試験用いる材料に規定する骨材品質を満たすものを使用した。混和剤については、AE 剤、AE 減水剤 (標準形)、AE 減水剤 (遅延形)、高性能 AE 減水剤 (標準形)、高性能 AE 減水剤 (遅延形)、および高性能減水剤を使用した。

表-2 にコンクリートの調合を示す。単位セメント量

*1 (株) 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 もの創造系領域 教授 (正会員)

は 300kg/m³ および 350kg/m³ の 2 水準とした。目標スランプは 8cm および 18cm の 2 水準とした。単位水量は、練上がり時のスランプが目標スランプの±1.0cm となる量とした。混和剤の使用量はいずれも、製造会社の推奨する量とした。

練混ぜは、20℃の試験室内で強制二軸練りミキサを用い、すべての材料をミキサに投入した後、1.5 分間練り混ぜた。

2.2 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、Ffin は凝結終結時凍結を示す。F6h は材齢 6 時間で凍結を開始したことを示し、No.5, 6, 9 で実施した。S7d→W は、材齢 7 日まで封緘養生を行い、その後水中養生であることを示し、水中養生の開始時期の影響について確認するために、No.5 において実施した。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。

2.3 実験方法

表-4 に測定項目および試験方法を示す。フレッシュコンクリートでは、スランプ、空気量およびコンクリート温度を測定した。ウェットスクリーニングによって採取したモルタルでは、凝結時間を測定した。硬化モルタルでは、No.6 の N, F6h, Ffin を対象に、全空隙率を測定した。全空隙率は、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。

圧縮強度試験は、試験体寸法を φ100mm×200mm とし、すべての条件で実施した。圧縮強度は、3 本の試験体の平均値を評価値とした。測定材齢は、材齢 7 日、28 日、91 日とした。静弾性係数の測定は、材齢 28 日の圧縮強度試験時に実施した。

塩分浸透深さは、高性能 AE 減水剤（標準形）を使用している調合ケースの No.6 において実施した。試験は、供試体 φ100mm×200mm を用い、温度 20℃、相対湿度 60% の条件で 4 週間気中養生し、塩水噴霧 2 時間 (35±1℃)、乾燥 4 時間 (20~30%RH)、湿潤 2 時間 (95%RH 以上) を 1 サイクルとして、JIS K 5600-7-9 (サイクル腐食試験方法) サイクル A に準拠して 5±1% の濃度の塩水を噴霧した。塩分浸透深さの測定は沖縄における 5 年間暴露に相当する 225 サイクル終了時に実施した。塩分浸透深さの測定方法は、硝酸銀溶液噴霧法⁶⁾ とした。試験体を縦方向に割裂し、割裂断面に 0.1mol/l 硝酸銀水溶液を噴霧して塩化物イオンを着色させ、コンクリート表面から白色に呈色した境界までの距離を各 10 箇所測定し、その平均値を試験結果とした。

促進中性化試験は、供試体 100mm×100mm×400mm

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	S	茨城県神栖市産砕砂, 表乾密度: 2.59g/cm ³ , F.M.: 2.30
粗骨材	G	東京都青梅市産砕石, 表乾密度: 2.65g/cm ³ , 実積率: 60.1%, 最大寸法: 20mm
混和剤	Ad	AE 剤 AE 減水剤 (標準形) AE 減水剤 (遅延形) 高性能 AE 減水剤 (標準形) 高性能 AE 減水剤 (遅延形) 高性能減水剤

表-2 コンクリートの調合

No.	混和剤	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					フレッシュ		
				W	C	S	G	Ad	S1 (cm)	Air (%)	温度 (°C)
1	Plain	61.0	47	183	300	860	1011	-	8.5	1.1	19.5
2	AE 剤	56.7	45	170	300	804	1024	7	9.0	4.6	20.5
3	AE 減水剤 (標準形)	51.7	45	155	300	821	1047	15	7.5	4.0	20.5
4	AE 減水剤 (遅延形)	51.7	45	155	300	821	1047	15	7.5	3.9	20.0
5	Plain	58.0	47	203	350	817	960	-	18.5	1.0	20.0
6	高性能 AE 減水剤 (標準形)	46.6	47	163	350	829	974	20	19.0	3.5	20.0
7	高性能 AE 減水剤 (遅延形)	46.6	47	163	350	829	974	20	18.5	4.3	20.0
8	Plain	53.7	46	188	350	817	1000	-	8.5	1.6	20.0
9	高性能減水剤	45.7	45	160	350	832	1060	15	7.0	1.7	20.0

表-3 凍結融解および養生条件

記号	C [kg/m ³]	スランプ [cm]	凍結融解条件			養生条件	試験材齢 [d]
			開始時間	温度 [°C]	サイクル数		
N	300	8	凍結なし			20℃ 水中	7 28 91
Ffin	350	18	終結時	-20℃ 12h	3		
F6h			6h				
Ffin-S7d→W	350	18	終結時	5℃ 12h	3	20℃封緘 7 日 →20℃ 水中	
F6h-S7d→W			6h				

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
	コンクリート温度	JIS A 1156
モルタル (ウェットスクリーニング)	凝結時間	JIS A 1147
	全空隙量	アルキメデス法
硬化コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108
	静弾性係数	JIS A 1149
	塩分浸透深さ	JIS K 5600-7-9
	中性化深さ	JIS A 1152

を用い、JIS A 1153 (コンクリートの促進中性化試験方法) に準拠し、No.6 の N, Ffin, F6h を対象に実施した。中性化深さは、JIS A 1152 (コンクリートの中性化深さの測定方法) に準じて測定した。

3. 実験結果

3.1 フレッシュ試験結果

表-2 にフレッシュコンクリートの試験結果を示す。スランブは、No.1~4, 8, 9 は $8 \pm 1.0\text{cm}$, No.5~7 は $18 \pm 1.0\text{cm}$ の範囲であった。

空気量は、Plain (No.1, 5, 8) で 1.0~1.6%, 高性能減水剤使用の No.9 は 1.7% であった。No.2, 3, 4, 6, 7 は 3.2~4.6% の範囲であった。

3.2 強度増進性状

図-1 に凝結時間試験結果を示す。図中には、凍結開始のタイミングを示した。凍結開始時間は全ての条件で凝結終了時とした。No.5, No.6, No.9 は、材齢 6 時間で凍結を開始しており、No.6, No.9 では凝結始発前に凍結を与えている条件となった。

図-2 に No.1~4 (単位セメント量 300kg/m^3 , 目標スランブ 8cm としたコンクリート) の圧縮強度試験結果を示す。No.1 の Plain の最終時凍結 (Ffin) は、強度が明らかに低い結果となった。一方、No.2 AE コンクリートの Ffin は、強度増進が停滞していない。また、

No.3 AE 減水剤 (標準形) および No.4 AE 減水剤 (遅延形) はともに、最終時凍結による強度増進の停滞は見られず、同様の強度増進性状であった。

図-3 に No.5~7 (単位セメント量 350kg/m^3 , 目標スランブ 18cm としたコンクリート) の圧縮強度試験結果を示す。No.5 Plain は、凍結を与えた条件すべての圧縮強度が低い結果となった。また、水中養生の開始時期が遅い Ffin-S7d→W および F6h-S7d→W は、強度増進が停滞する結果となった。No.6 高性能 AE 減水剤 (標準形) および No.7 高性能 AE 減水剤 (遅延形) はともに、最終時凍結による強度増進の停滞は見られず、同様の強度

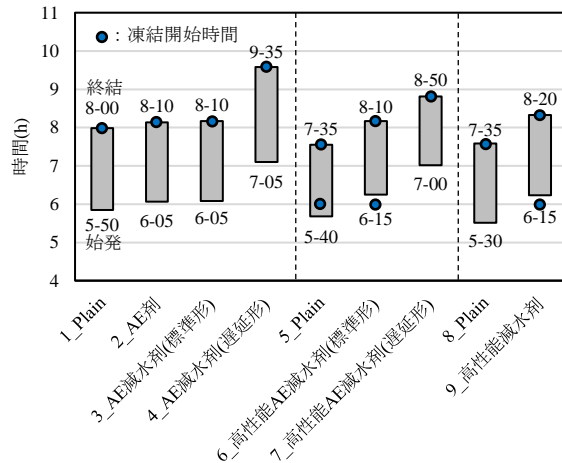


図-1 凝結時間試験結果

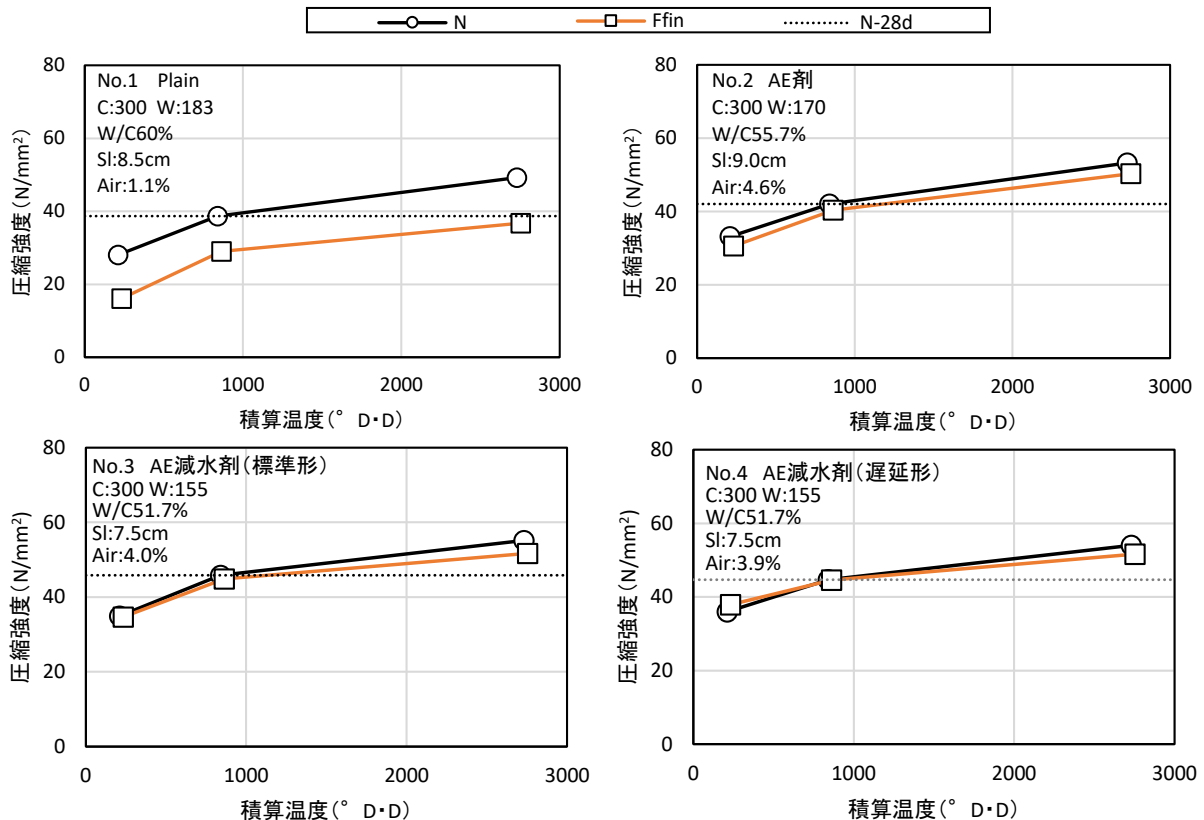


図-2 圧縮強度試験結果 No.1~4 (C:300kg/m³, 目標SI:8cm)

増進性状であった。

図-4にNo.8, No.9 (単位セメント量 350kg/m³, 目標スランプ 8cm としたコンクリート) の圧縮強度試験結果を示す。No.8, No.9 の Ffin は, N に比べて強度低下している。No.9 の Ffin は, No.6 と同等の単位セメント量, 単位水量であるが, 強度低下する結果となった。既往の研究において空気量の確保は初期凍害防止に有効であるとされており²⁾, 空気量が小さいことが, 強度低下の一因と考える。また, 既往のモルタルを使用した実験⁵⁾ (non-AE, W/C55%) では, 凝結終結以降の凍結であれば強度増進は停滞しない結果であったが, 本実験における No.1, 5, 8 のコンクリート (non-AE, W/C60, 58, 53.7%) では, 凝結終結時の凍結によって強度増進が停滞する結果であった。

3.3 圧縮強度と各種要因の関係

図-5に空気量と N28d に対する強度比の関係を示す。空気量を 4.5%程度確保した Ffin は, 強度比 90%以上であった。一方, 空気量 1.0%程度の Ffin は, 強度比が 75~90%程度と小さかった。

図-6に材齢 91 日における空気量と N28d に対する強度比の関係を示す。空気量が大きいほど N28d に対する強度比が高くなる傾向であり, 凝結終結時に凍結を受けたコンクリートの強度増進に対しても, 空気量が有効に働く結果であった。

図-7に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。全ての静弾性係数が, 推定式で計算される値の 80%以上を満足する結果であった。

3.4 耐久性試験結果

図-8に圧縮強度と中性化速度係数の関係を示す。F6h は中性化速度係数が大きく, 既往の研究⁷⁾同様に, 強度低下が生じたものは中性化速度係数が大きい結果となった。Ffin は, 圧縮強度と中性化速度係数ともに N と同等の結果となった。既往の研究では, 初期凍害の兆候を示さないにも関わらず, 中性化抵抗性が低い結果になったものも報告されており⁸⁾, より多くの実験データによって, 初期材齢時の凍結がコンクリートの耐久性に及ぼす影響について検討する必要がある。

図-9に圧縮強度と塩分浸透深さの関係を示す。F6h は, 塩分浸透深さが大きい傾向にあるが, 圧縮強度の増加に伴い, 塩分浸透深さが小さくなっている。Ffin は, 圧縮強度増進に伴い, 凍結なしと同等の塩分浸透深さとなっている。

図-10に圧縮強度と全空隙率の関係を示す。F6h は, 全空隙率が大きい傾向にあるが, 圧縮強度の増加に伴い, 全空隙率が小さくなっている。Ffin は, 圧縮強度増進に伴い, 凍結なしと同等の全空隙率となっている。

本実験の範囲では, 凝結終結時凍結の後に, 凍結なし

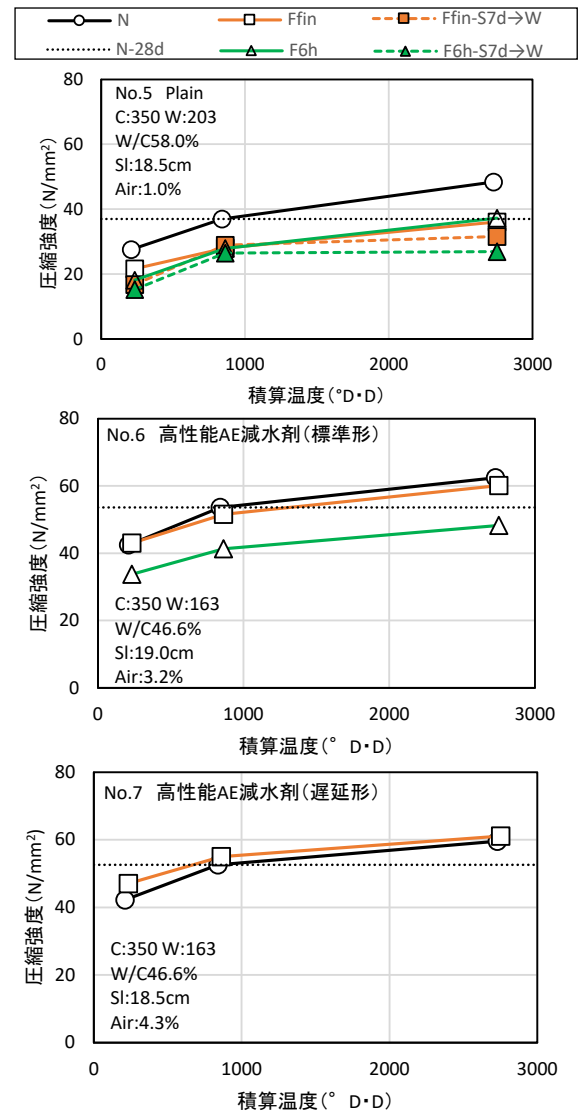


図-3 圧縮強度試験結果 No. 5~7 (C:350kg/m³, 目標 Sl:18cm)

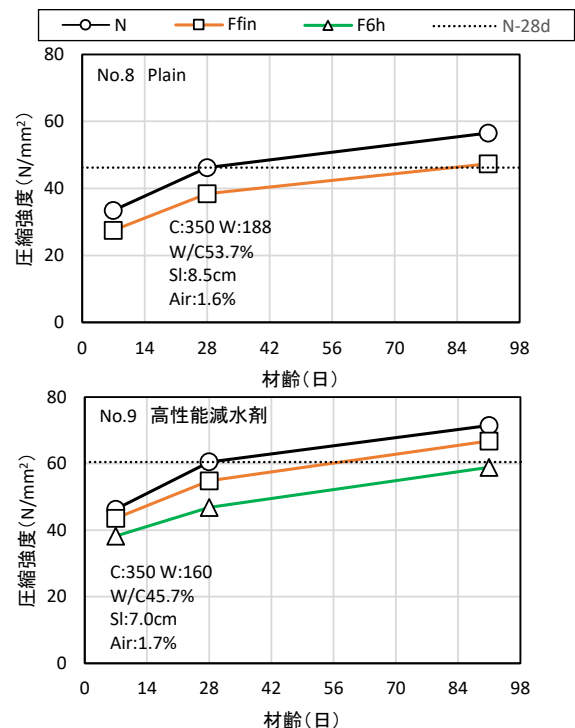


図-4 圧縮強度試験結果 No. 8, 9 (C:350kg/m³, 目標 Sl:8cm)

同等の圧縮強度となれば、中性化抵抗性および塩分浸透抵抗性には大きな違いは見られなかった。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 混和剤による連行空気がないものは、凝結終結時の凍結によって強度増進が停滞する結果となった。
- (2) 凝結終結時に凍結を受けたコンクリートの強度増進に対しても、空気量が有効に働く結果であった。
- (3) AE減水剤、高性能AE減水剤ともに、標準形と遅延形の違いによる、終結時凍結後の強度増進への影響は見られなかった。

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，pp443-448，2018.10
- 5) 山下紘太郎，古館菜由子，金志訓，濱幸雄：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.497-502，2019
- 6) 青木優介，嶋野慶次，三好佑果，鈴木正志：硝酸銀溶液噴霧法による硬化コンクリート中への塩化物イオン浸透予測，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.759-764，2008

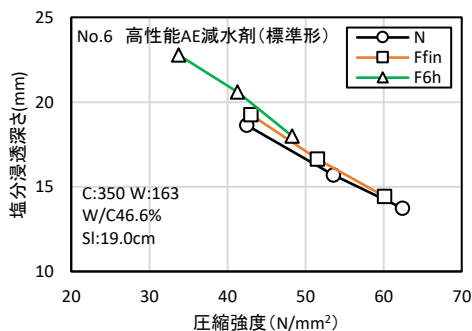


図-9 圧縮強度と塩分浸透深さの関係 (No. 6)

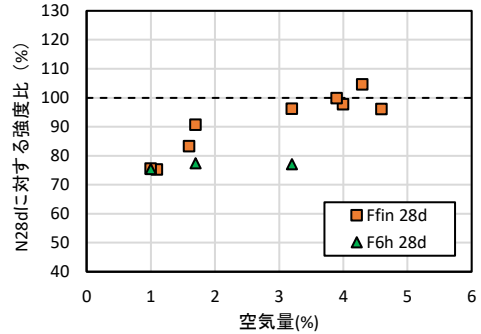


図-5 空気量と圧縮強度比の関係 (材齢 28 日)

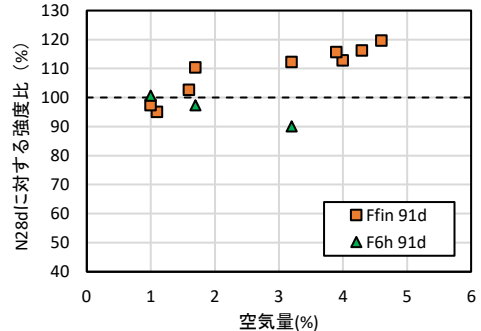


図-6 空気量と圧縮強度比の関係 (材齢 91 日)

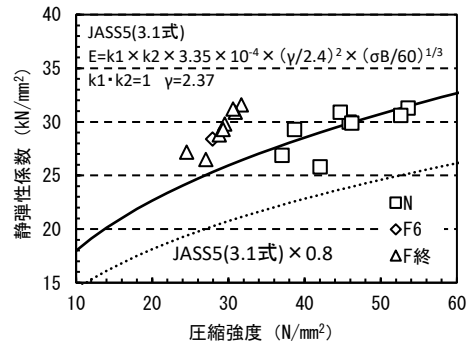


図-7 圧縮強度と静弾性係数の関係(材齢 31 日)

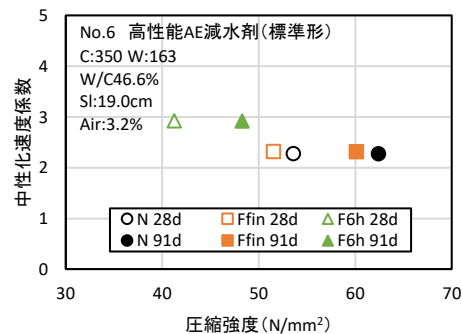


図-8 圧縮強度と中性化速度係数の関係 (No. 6)

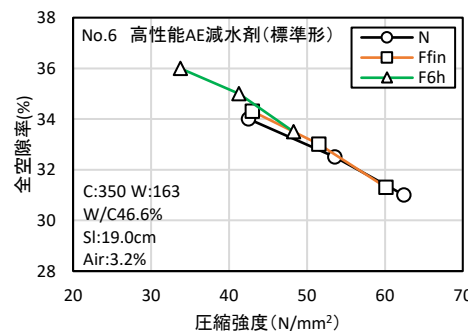


図-10 圧縮強度と全空隙率の関係 (No. 6)

7) 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

8) 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