

# 論文 撥水性多孔質粉体を混和したモルタルの空気量および凍結融解抵抗性の変化

新 大軌<sup>\*1</sup>・谷本 文由<sup>\*2</sup>・岸本 嘉彦<sup>\*3</sup>・濱 幸雄<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本研究では、撥水性多孔質粉体がモルタルの凍結融解抵抗性および練り混ぜ時の空気混入量に及ぼす影響を明らかにすることを目的として検討を行った。撥水性多孔質粉体をモルタルに混和することにより空気量は大きく増加し、その影響は粉体の粒度、置換率に依存する結果となった。また、撥水性多孔質粉体をモルタルに混和することにより凍結融解抵抗性は向上し、これはモルタル中に導入した水の入りにくい空隙による水圧緩和による凍結融解抵抗性向上効果よりも主に撥水性多孔質粉体混和による空気量の増加によるものであると考えられた。

**キーワード:** 撥水性多孔質粉体, 空気量, 相対動弾性係数, 耐久性指数, 凍結融解抵抗性

## 1. はじめに

近年、社会の発展とともにコンクリート構造物が大型化・高層化など多様化しており、コンクリートのさらなる高強度化、高耐久化が求められている。高強度コンクリートを構造物に適応する場合には、強度確保のみならず、建物の耐久性を確保するための品質・性能も重要となる。北海道などの積雪寒冷地においては、コンクリート構造物は厳しい気象条件により様々な有害な作用を受けるが、その中でもとくにコンクリート中に含まれる水分の凍結融解の繰り返しによる凍害劣化が重要な問題であり、凍結融解作用によるコンクリートの耐久性の低下が発生しないために性能を確保することが必要不可欠である。

一般にコンクリートの耐凍害性は空気量により品質管理が行われており、コンクリート中に微細な空気泡(エントレインドエア)を連行させるために AE 剤や AE 減水剤などが用いられている。コンクリートの耐凍害性を確保するためには気泡同士の距離である気泡間隔係数は 200~250 $\mu\text{m}$  以下とすることが望ましいとされており<sup>1)2)</sup>、これは直径 300 $\mu\text{m}$  以下の微細気泡を空気量で 1.8%以上確保する必要があることに相当する<sup>3)</sup>。また、高強度コンクリートでは non-AE コンクリート(空気量 1.4%~2.3%)でも優れた耐凍害性を有すること、空気連行による強度低下を避けたいという意向から non-AE コンクリートとして使用される場合もあるが、高強度コンクリートであっても自然環境にさらされることにより経年したものでは耐凍害性が低下するとの報告もあり、耐凍害性確保のためには高強度コンクリートであっても空気連行

が必要であることも指摘されている<sup>4)</sup>。

一方、空気量が適量確保されている AE コンクリートの実験において、促進凍結融解試験(JIS A 1148 B 法:気中凍結水中融解試験)では十分な耐凍害性を示したにも関わらず、暴露試験では AE コンクリートが non-AE コンクリートと同等の凍害劣化傾向を示すことも指摘されている。これは、長期間、夏期の高温状態での乾燥、降雨などの自然環境にさらされることにより、凍結時の水圧緩和に重要な役割を果たすとされる気泡が役割を果たさなくなる可能性があることを示唆しているものと考えられる<sup>5)</sup>。また、田畑ら<sup>6)</sup>によって、コンクリートの乾燥程度と耐凍害性には密接な関係があり、軽微な乾燥は耐凍害性を向上させる効果があることが報告されており、耐凍害性の向上には凍結融解時に発生する水圧を緩和できるような水の入っていない空隙が必要であることを示唆しているものと考えられる。

本研究では、撥水性を有する軽量気泡コンクリート(撥水性 ALC)に着目し、撥水性軽量気泡コンクリートを微細に粉砕した撥水性多孔質粉体をモルタルに混和させ、水の入りにくい毛細管空隙をコンクリート中に存在させることによって、凍結融解作用時における水圧緩和への効果を検討することを目的とした。また、撥水性多孔質粉体を混和することにより、練り混ぜ時の空気混入量にも変化が起きることが予想されるため、これについてもあわせて検討、考察した。

近年ではコンクリート製造の際の環境負荷低減も重要な課題であり、AE 剤や AE 減水剤などの石油化学製品の使用量削減も必要になってくる可能性がある。本研究

\*1 室蘭工業大学大学院 工学研究科くらし環境系領域 助教 博士(工学) (正会員)

\*2 J F E ミネラル(株) 環境プロジェクト部 (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 博士(工学) (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 博士(工学) (正会員)

表-1 モルタル調合表

シリーズ	記号	W/C (%)	単位質量(kg/m <sup>3</sup> )				絶対容積(l/m <sup>3</sup> )				
			単位水量	普通ポルトランドセメント	多孔質粉体	フライアッシュ	細骨材	普通ポルトランドセメント	多孔質粉体	フライアッシュ	細骨材
I	A	50	321	641	—	—	1282	—	—	—	477
	NL10				64	—	1207	28	—	449	
	NL20				128	—	1132	56	—	421	
	DL10				64	—	1207	28	—	449	
	DL20				128	—	1132	56	—	421	
	DM5				32	—	1245	14	—	463	
	DM10				64	—	1207	28	—	449	
	DM20				128	—	1132	56	—	421	
	DS10				64	—	1207	28	—	449	
	DSS10				64	—	1207	28	—	449	
II	SL10	50	321	641	64	—	1207	28	—	449	
	SM5				32	—	1245	14	—	463	
	SM10				64	—	1207	28	—	449	
	SM20				128	—	1132	56	—	421	
	SS10				64	—	1207	28	—	449	
	SSS10				64	—	1207	28	—	449	
III	FA	50	321	641	—	64	1202	—	30	447	
	FM10				64	—	1127	28	—	419	
	FM20				128	—	1052	56	—	391	

表-2 実験計画表

シリーズ	試験体記号	W/C (%)	多孔質粉体			試験体寸法(cm)	測定項目
			種類	粒径(μm)	置換率(%)		
I	A	50	—	—	0	4×4×16	空気量 凍結融解試験
	NL10		撥水性無し	300~600	10		
	NL20		無し	600	20		
	DL10		撥水性有り	300~600	10		
	DL20			600	20		
	DM5			150~300	5		
	DM10			300	10		
	DM20			300	20		
	DS10			75~150	10		
	DSS10		~75	10			
II	SL10	50	撥水性有り	300~600	10		
	SM5			150~300	5		
	SM10			300	10		
	SM20			300	20		
	SS10			75~150	10		
	SSS10			~75	10		
III	FA	50	—	—	0	4×4×16	凍結融解試験
	FM10		撥水性有り	150~300	10		
	FM20		300	20			

こうした観点からも重要なデータを提供しているものと考えられる。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および実験水準

表-1 に作製したモルタルの調合表を、表-2 に実験計画表を示した。セメントは、いずれのモルタルにおいても普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比

表-3 フライアッシュの物理試験結果

品質	種類	フライアッシュII種	
		JIS A 6201規定	試験値
二酸化ケイ素	%	45.0以上	68.6
湿分	%	1.0以下	0.15
強熱減量 <sup>1)</sup>	%	5.0以下	1.7
密度	g/cm <sup>3</sup>	1.95以上	2.2
粉末度 <sup>2)</sup>	45μmふるい残分 <sup>3)</sup> (網ふるい方法)	%	40以下
	比表面積 (ブレーン方法)	cm <sup>2</sup> /g	2500以上
フロー値比	%	95以上	106
活性度指数(%)	材齢28日	80以上	86
	材齢91日	90以上	104

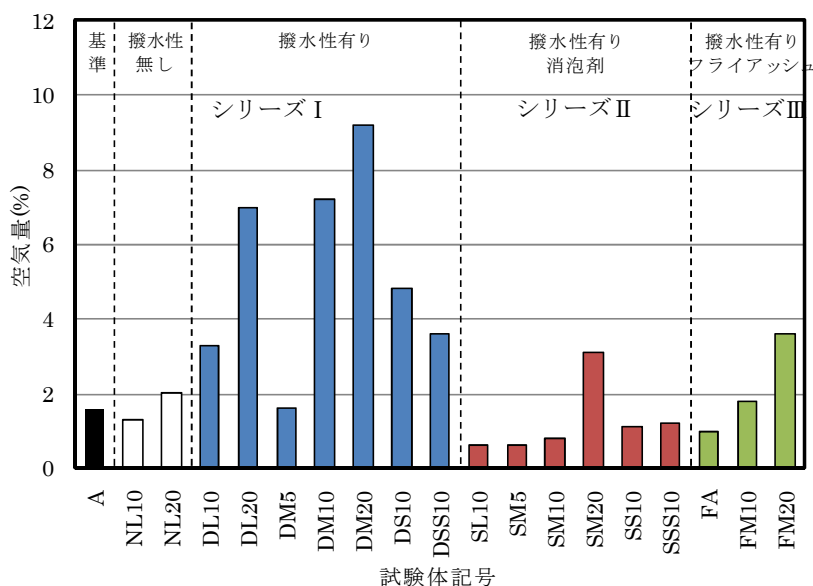
注1)未燃炭素測定による場合は、その試験値に(炭素)と付記。

2)粉末度は、網ふるい方法またはブレーン方法による。

3)粉末度を網ふるい方法による場合は、ブレーン方法による比表面積の試験結果を参考値として併記する。

を50%としたモルタルによって行った。また、本実験で使用した多孔質粉体は密度0.5g/cm<sup>3</sup>の市販の軽量気泡コンクリートALCおよびそのALCにシリコンオイルによって撥水性を付与したものを表-2 に示す所定の粒度に粉砕して作製した。

シリーズIでは、撥水性を有するものと持たないもの2種類の粉体を使用し、粉体の粒径を600μm~300μm(DL)、300μm~150μm(DM)、150μm~75μm(DS)、75μm以下(DSS)の4水準、粉体置換率をセメントの外割りで0%、5%、10%、20%の4水準とし、撥水性多孔質粉体がモルタルの空気量へ及ぼす影響および撥水性を有する空隙の効果について、粉体の粒径、置換率の点から検討した。



図一 撥水性多孔質粉体混和によるモルタル空気量の変化

シリーズIIでは、撥水性の有る粉体と消泡剤を用いて、練り混ぜによって巻き込まれる空気連行の影響を極力取り除き、撥水性を有する空隙のみの耐凍害性への効果を確認することを目的とした。消泡剤の添加率は  $C \times 0.01\%$  とした。

一般にフライアッシュを使用した場合、フライアッシュ中の未燃カーボンが AE 剤や AE 減水剤を吸着し、空気連行性が大幅に低下することが指摘されている。撥水性多孔質粉体により AE 剤を用いずにモルタルに空気連行することが可能であれば、AE 剤や AE 減水剤で起こりうる空気連行性の低下を防ぐことができる可能性があることになり、新しい空気連行の技術開発にもつながるものと思われる。以上の観点から、シリーズIIIでは粒径  $300\mu\text{m} \sim 150\mu\text{m}$  の撥水性多孔質粉体を置換率 10%、20% 混和したものにフライアッシュをセメント重量の 20% を骨材置換して混和し、撥水性多孔質粉体がモルタルの空気量へ及ぼす影響を検討し、耐凍害性への影響についてもあわせて検討した。使用したフライアッシュは JISA6201 コンクリート用フライアッシュ II 種であり、その物理試験結果を表-3 に示す。

試験体寸法は  $4 \times 4 \times 16\text{cm}$  とし、フレッシュ状態において圧力法における空気量の測定および 4 週水中養生後、JIS A 1148A 法に準拠した凍結融解試験を行った。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 撥水性多孔質粉体混和によるモルタル空気量の変化

図-1 に、圧力法により測定したモルタルの空気量の結果を示す。

基準 A と多孔質粉体を混和したシリーズ I を比較する

と、粉体を混和していない基準 A のモルタルおよび撥水性の無い粉体を混和したモルタル NL10, NL20 に比べて、撥水性を有する多孔質粉体を混和したモルタルでは空気量が大きく増加しており、撥水性を有する多孔質粉体は優れた空気連行性を有していることが明らかである。これは、AE 剤の起泡作用と同様に、撥水性を有する粉体の疎水性により、練り混ぜ時に水と空気の界面で起泡することにより、空気連行量が増加したものと考えられる。また、撥水性多孔質粉体の置換率が同じ場合でのモルタル空気量は、 $150\mu\text{m} \sim 300\mu\text{m}$  の粒径の粉体を用いた DM が他の粒径の粉体を用いた DL, DS, DSS に比べて良好な空気連行性を示した。これは、粒径の大きい DL では粉体の界面が少ないために空気連行性が小さく、粒径が DM 程度になると界面が増加することによって空気連行性が向上したと考えられる。しかし、粒径が DS, DSS 程度まで小さくなると粉体の凝集の影響が現れることにより、粉体の界面が減少し空気連行性が低下しているものと考えられ、撥水性多孔質粉体の粒径によって空気連行作用は異なるものと思われる。また、いずれの粒径の撥水性多孔質粉体を混和した場合も、置換率が増加するに従い空気量が増加していることもわかる。

つぎに、粉体中の撥水性のある水の入らない空隙の水圧緩和効果を検討するために消泡剤を用いたシリーズIIでは、消泡剤を用いることによりシリーズ I と比較してモルタルの空気量は大きく減少しており、これにより 3.2 で検討をおこなう撥水性多孔質粉体中の空隙が耐凍害性に及ぼす影響を空気量増加の影響を切り離して検討できるものと推察できる。ただし、粒径  $150\mu\text{m} \sim 300\mu\text{m}$  の撥水性多孔質粉体で 20% 置換した場合 SM20 では、消泡剤を用いたにも関わらず 3% 以上の空気量となっており、

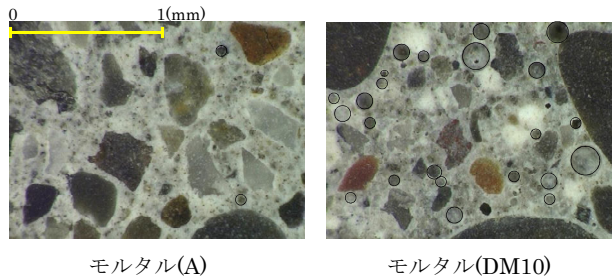


図-2 撥水性多孔質粉体による連行空気(モルタル断面)

この理由については今後さらに詳細な検討が必要であると考えられる。

また、フライアッシュをセメント重量の20%を骨材置換してモルタルを作製したシリーズⅢでは、撥水性多孔質粉体を混和していないFAでは、空気量は基準Aに比べて若干減少しているが、粉体を混和することにより空気量は増加し、FM20では3%程度の空気量を確保できていることが分かる。

図-2に一例として撥水性多孔質粉体を混和していないAと多孔質粉体を混和したDM10のモルタル試験体の断面の状態を示した。

モルタルAにおいては試料断面中に気泡はほとんど確認できないが、モルタルDM10では断面中に多数の気泡が確認されており、前述したように撥水性多孔質粉体を混和したモルタルにおける空気量の増加を裏付けるものとなっている。

以上の結果のように、撥水性多孔質粉体はAE剤と同様の空気連行作用を有するものと考えられ、撥水性多孔質粉体を混和することでコンクリート中の空気量を増加させる効果があることが明らかとなった。

### 3.2 撥水性多孔質粉体混和によるモルタルの耐凍害性の変化

JIS A 1148A法に準拠した凍結融解試験によるモルタルの相対動弾性係数の変化を図-3に示す。

シリーズⅠについて、多孔質粉体を混和していない基準A、また、撥水性の無い多孔質粉体を混和したNL10、NL20では、凍結融解試験により相対動弾性係数が大きく低下している。一方、撥水性多孔質粉体を混和したモルタルでは凍結融解試験による相対動弾性係数の低下がAやNL10、NL20に比べて抑えられていることが明らかである。

次に3.1の空気量の結果から撥水性多孔質粉体中の空隙が耐凍害性に及ぼす影響を空気量増加の影響を切り離して検討できるものと考えられるシリーズⅡについては、SM20以外のモルタルでは撥水性多孔質粉体を混和したAに比較して凍結融解試験による相対動弾性係数の低下が同程度かむしろ激しい結果となった。ただし、SM20

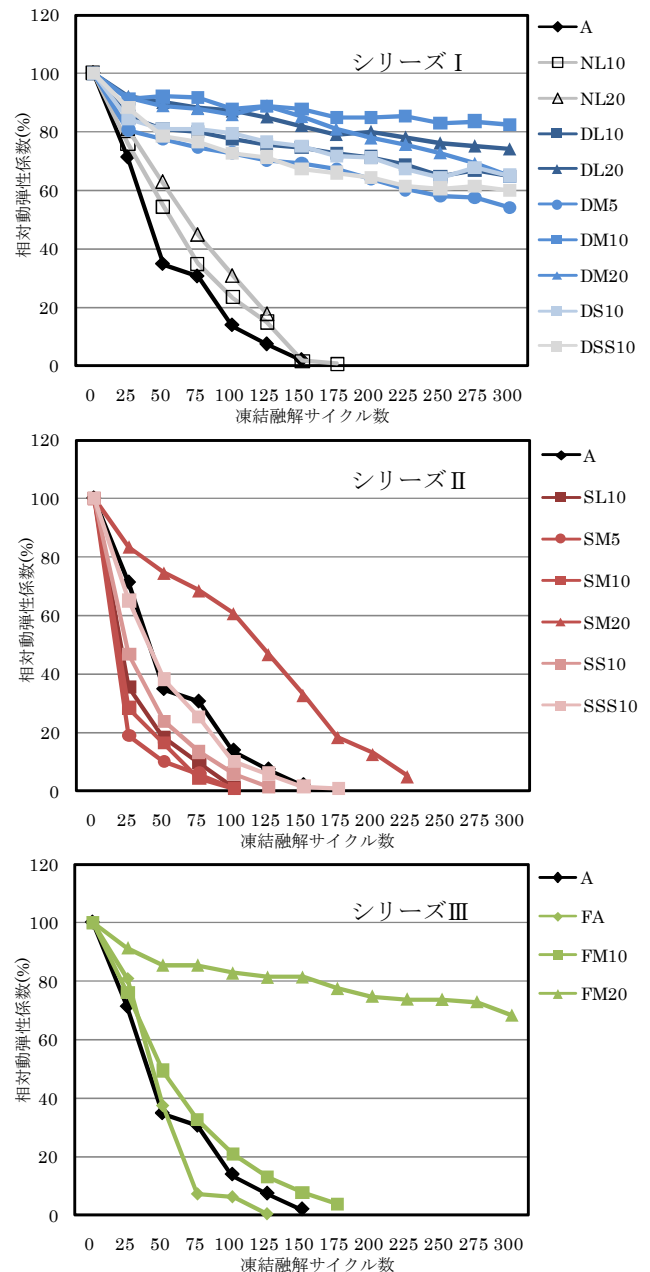


図-3 JIS A 1148A法に準拠した凍結融解試験によるモルタルの相対動弾性係数の変化

についてはAに比べて耐凍害性は向上しているが、これは3.1の結果でも示したように空気量の増加が大きく影響しているものと考えられる。以上のように、コンクリート中の水の入りにくい空隙は、凍結時の水圧緩和硬化を有し耐凍害性の向上が期待できると考えていたが、本研究の検討範囲ではその効果はほとんど確認できない結果となり、凍結時の圧力を緩和できるだけの空隙を、粉体中の空隙だけでは確保できなかったことを示唆しているものと考えられる。また、撥水性多孔質粉体を混和したもののほうがむしろ凍害劣化が激しい傾向もみられるが、これは粉体混和により粉体中のトバモライトがコンクリート中のセメントの水和物と一部結合することによりセメント硬化体の空隙構造が変化したことが理由であると

考えられる。鎌田ら<sup>7)</sup>および青野ら<sup>8)</sup>はセメントペースト硬化体の空隙構造により耐凍害性が変化することを報告しており、今回も空隙構造の変化が耐凍害性に影響を及ぼしているものと推察しているが、詳細な検討については今後の課題とする。

シリーズⅢでは、撥水性多孔質粉体を用いていない比較用フライアッシュモルタル FA, 撥水性多孔質粉体を置換率 10%で混和した FM10 については、耐凍害性が劣る結果となり、空隙の効果も確認できなかった。一方、撥水性の有る粉体を置換率 20%で混和した FM20 については、A に比べて耐凍害性は向上しており、これはシリーズⅡの場合と同様に、粉体により空気が連行されたことによると考えられる。

最後に撥水性多孔質粉体によって連行された空気が耐凍害性へ及ぼす影響について整理するために、空気量と凍結融解抵抗性の耐久性指数の関係について整理した。図-4 にその結果を示す。

なお、ここでの耐久性指数は次の式(1)で求めた。

$$\text{耐久性指数} = P \times N / M \quad (1)$$

ここで、P は N サイクルの時の相対動弾性係数(%), N は相対動弾性係数が 60%になるサイクル数または 300 サイクルのいずれか小さいもの、M は 300 サイクルである。

一般に、コンクリートの耐凍害性は空気量が 4~7%の範囲で良好な耐久性を示すことが指摘されているが、本実験においても撥水性多孔質粉体を混和した空気量が 3%程度以上となっている試験体については、耐久性指数が大きく増加しており良好な耐凍害性を示していることがわかる。一方、撥水性の無い多孔質粉体を混和したものは空気泡が連行されておらず、このために耐凍害性が確保できなかったものと考えられる。

以上のように、撥水性多孔質粉体を混和すると AE 剤と同様に空気を連行する効果があり、モルタルの空気量が増加することにより凍結融解抵抗性が向上することが明らかとなった。

#### 4. まとめ

本研究では、撥水性軽量気泡コンクリートを微細に粉碎した撥水性多孔質粉体がモルタルの凍結融解抵抗性および練り混ぜ時の空気混入量に及ぼす影響を明らかにすることを目的として検討を行った。これはモルタル中に導入した水の入りにくい空隙による水圧緩和による凍結融解抵抗性向上効果よりも主に撥水性多孔質粉体混和による空気量の増加によるものであると考えられた。

(1) 撥水性多孔質粉体をモルタルに混和することにより

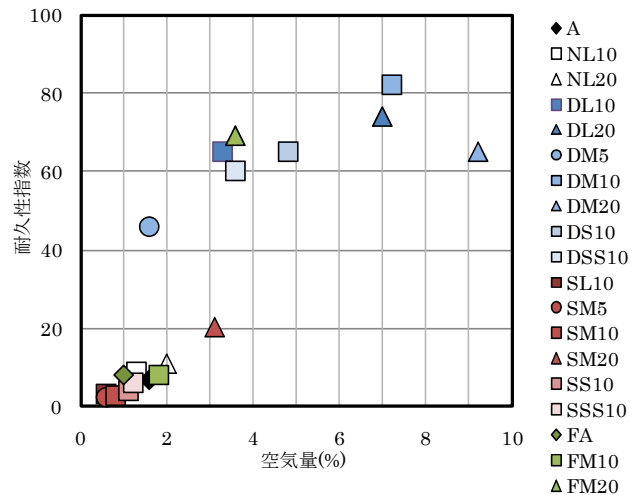


図-4 耐久性指数と空気量の関係

空気量は大きく増加し、150 $\mu$ m~300 $\mu$ m の粒径の粉体を用いたものが良好な空気連行性を示した。また、粉体の置換率が増加するにしたがいに空気量が増加する結果となった。

(2) 撥水性多孔質粉体を混和することによりモルタルの凍結融解抵抗性は向上した。また、消泡剤を用いて練り混ぜ時の空気連行の影響を極力取り除いた場合には凍結融解抵抗性は向上しない結果となった。

(3) 本研究の検討範囲では、コンクリート中の水の入りにくい空隙が凍結時の水圧緩和による凍結融解抵抗性向上効果は確認できなかった。

#### 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(基盤研究(B), No. 21360259)によったことを付記し、ここに感謝の意を表します。また、本研究を遂行するに当たり住友金属鉱山シボレックス(株)青野義道氏および室蘭工業大学大学院生・菅原奈美氏(現、会澤高圧コンクリート)、村井洋公氏の協力を得ましたのであわせて、感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) T.C.Powers: The air requirement frost-resistant concrete, Proceedings of Highway Research Board, 29, pp.184-211, 1949
- 2) J.E.Backstrom, R.W.Burrows, R.C.Mielenz and V.E.Origin : Evaluation and effects of the air void system in concrete. Part 2-Influence of type and amount of air-entraining agent, UJournal of the American Concrete Institute, 55, pp.261-272, 1958
- 3) M.Pigion, J.Prevost and J.M.Simard: Freeze-thaw durability vs freezing rate, Journal of American Concrete Institute, 82(5), pp.684-692, 1985

- 4) 濱幸雄ら：高強度・高流動コンクリートの耐凍害性に及ぼす養生条件の影響と評価方法に関する研究，セメント・コンクリート，No.697, pp.44-50, 2005
- 5) 平野彰彦ら：寒冷地における長期暴露性状と凍結融解抵抗性に関する研究，日本・中国・韓国国際シンポジウム論文集，pp.123~127, 2008
- 6) 田畑雅幸ら：コンクリートの耐凍害性に及ぼす乾燥の影響，セメントコンクリート，No.383, 1979
- 7) 鎌田英治ら：コンクリートの凍害と細孔構造，コンクリート工学年次論文集，Vol.10, No.1, pp51-60, 1988
- 8) 青野義道ら：乾燥による硬化セメントペーストのナノ構造変化と耐凍害性への影響，コンクリート工学論文集，Vol.19, No.2, pp.21-34, 2008